

10. Аппаратура потребителя

10.1. Требования к аппаратуре потребителя

В современных условиях, когда спутниковые навигационные технологии становятся одним из основных средств навигации и управления подвижными объектами аппаратура потребителя должна удовлетворять целому ряду требований, сформулированных в международных, национальных и ведомственных стандартах.

Аппаратура потребителей становится составной GNSS и должна взаимодействовать с элементами GNSS: SBAS, GBAS, ABAS, DGNSS.

В современных комплексах аппаратура потребителей GNSS состоит не только из приемника спутниковых сигналов. В ее состав включаются и средства приема информации от систем наземного и космического функциональных дополнений.

Информация, принимаемая и обрабатываемая навигационным приемником в свою очередь может поступать в другие системы и комплексы, управляющие подвижными объектами.

Приведем основные требования, которые предъявляются стандартами и рекомендованной практикой ИКАО к бортовому спутниковому навигационному приемнику.

Приемник должен через антенно-фидерное устройство принимать и обрабатывать сигналы элементов GNSS, с которыми он взаимодействует, а именно: сигналы спутников GPS, ГЛОНАСС, GEO SBAS, наземного функционального дополнения GBAS по линии передачи данных ОВЧ-диапазона, сигналы DGNSS.

В зоне видимости потребителя потенциально может находиться 9-11 спутников GPS, 9-11 спутников ГЛОНАСС, спутники GEO SBAS. Поэтому навигационный приемник может взаимодействовать, примерно, с 19- 23 спутниками. Учитывая, что число спутников GPS-24, ГЛОНАСС-24 (потенциально), GEO-3 в приемнике может быть 51 канал. Для проведения одномоментных измерений приемник должен иметь 19-23 канала. Естественно, что эти количества каналов нужно рассматривать как ориентировочные.

Основные требования к GNSS (GPS/ГЛОНАСС) приемнику.

Приемник должен исключать из решения навигационной задачи любой спутник, обозначенный неработоспособным признаком состояния здоровья эфемерид (подкадр 1, слово 3, разряды 17-22 спутника GPS; строка 2, разряды 80-72, признак B_n для спутника ГЛОНАСС).

Приемник должен обеспечивать непрерывное сопровождение минимум четырех спутников и решение навигационной задачи на основе измерений этим спутникам.

Приемник GPS должен компенсировать динамическое доплеровское смещение в измерениях по коду C/A и фазе несущей номинального SPS сигнала и доплеровское смещение, которое является уникальным для предполагаемого применения.

Приемник ГЛОНАСС должен компенсировать влияние доплеровского смещения на измерение начальной фазы несущей радиосигнала ГЛОНАСС.

Приемник GPS перед решением любой навигационной задачи удостоверяется в правильности применения времени и эфемерид, непрерывно отслеживает значения идентификатора набора параметров времени (IODC), идентификатора набора эфемерид (IODE), обновляет эфемериды, и параметры времени при обнаружении изменения значений одного или обоих этих параметров, использует временные параметры и эфемериды вместе с соответствующими им значениями IODC и IODE для данного спутника.

Приемник ГЛОНАСС должен удостоверяется в правильности применения эфемеридной и временной информации, поступающей со спутников ГЛОНАСС до решения навигационной задачи.

Приемник должен удовлетворять требованиям к помехозащищенности согласно стандарта и рекомендованной практики ИКАО.

Совмещенный приемник GNSS (GPS+ ГЛОНАСС) должен удовлетворять требованиям для приемника GPS, и требованиями для приемника ГЛОНАСС.

GNSS приемник, взаимодействующий с SBAS.

Приемник должен принимать и обрабатывать сигналы SBAS, удовлетворять требованиям к приемнику GPS.

Измерения псевдодальности по каждому спутнику должны сглаживаться с использованием измерений несущей и сглаживающего фильтра, имеющего отклонения после инициализации менее чем 0.1 м за 200 секунд относительно устойчивого состояния отклика фильтра при наличии дрейфа между фазой кода и интегрированной фазой несущей до 0.01м/сек.

Сглаживание по несущей должно выполняться при применении следующего фильтра:

$$P_{CSCn} = \alpha P + (1 - \alpha)[P_{CSCn-1} + (\lambda/2\pi)(\phi_n - \phi_{n-1})],$$

где:

P_{CSCn} – сглаженная псевдодальность;

P_{CSCn-1} – предыдущее значение сглаженной псевдодальности;

P – необработанные («сырые») измерения псевдодальности;

λ – длина волны на частоте L1;

ϕ_n – фаза несущей;

ϕ_{n-1} – предыдущее значение величины фазы несущей;

α - весовой коэффициент фильтра (интервал выборки/постоянная времени, равная 100 секунд).

Приемник при приеме со спутника GEO SBAS сообщения типа 0 должен прекратить работы с этим спутником (кроме слежения за спутником) и не использовать все принятые с него данными в течение, как минимум одной минуты.

Приемник должен использовать данные о целостности или корректирующую информацию, только при IODP для этой информации совпадающим с признаком IODP для маски PRN.

Приемник должен использовать данные об ионосфере от спутника GEO SBAS (оценку вертикальной задержки IGP и $GIVEI_i$), только если признак $IODI_k$, связанный с этими данными в сообщении типа 26, совпадает с $IODI_k$, связанным с соответствующей маской диапазона IGP, передаваемой в сообщении типа 18.

Приемник должен использовать самые последние принятые данные о целостности, для которых признак $IODF_j$ равен 3, или совпадает с признаком $IODF_j$, связанным с применяемыми быстрыми поправками.

Приемник должен применять любую региональную деградацию к параметрам σ^2 и $\sigma_{i, UDRE}$ (сообщение типа 27) и мгновенно использовать более высокий показатель $\delta UDRE$. Более низкий $\delta UDRE$ в новом сообщении типа 27 не используется до тех пор, пока не будет принят полный набор сообщения с новым признаком IODS.

Для спутников GPS, приемник должен применять долгосрочные поправки, только если признак IOD совпадает с признаком IODE и 8 младшими разрядами признака IODC.

Приемник не должен участвовать в обеспечении операции точного захода на посадку при потере четырех последовательных сообщений SBAS.

Приемник не должен использовать любой передаваемый параметр данных, если его срок действия истек.

Приемник не должен использовать быструю поправку, если интервал времени (Δt) для ее отнесенный к скорости изменения дальности превышает интервал действия для быстрых поправок, или если возраст RRC превышает $8\Delta t$.

Приемник при выполнении операций точного захода на посадку должен взаимодействовать со спутниками, угол места которых более 5° .

Приемник должен прекращать использование данных спутника при операциях точного захода на посадку, если $\sigma_{UDRE}^2 > 12$.

При операциях точного захода на посадку среднеквадратическое значение погрешности (RMS) полного вклада бортовой погрешности в погрешность скорректированной псевдодальности для спутников GEO SBAS при минимальной мощности принимаемого сигнала, наихудшей помеховой обстановке, не должна превышать 1,8 м, без учета эффектов многолучевости, тропосферных и ионосферных остаточных погрешностей. Для прогнозирования об

служивания погрешность за счет многолучевости предполагается меньшей 0.6 м (одна сигма).

При операциях взлет, полет на маршруте, в зоне аэропортов и неточном заход на посадку среднеквадратическое значение (RMS) полного вклада бортовой погрешности в погрешность скорректированной псевдодальности для спутников GEO SBAS при минимальной мощности принимаемого сигнала и при наихудшей помеховой обстановке не должно превышать 5 м, без учета эффектов многолучевости, тропосферных и ионосферных остаточных погрешностей.

При вычислении координат спутников GEO SBAS приемник должен декодировать сообщение типа 9, определить смещение фазы PRN кода и вычислить координаты (X_G , Y_G , Z_G).

Приемник должен идентифицировать спутники GEO SBAS при ложном приеме спутникового сигнала, обусловленного кросс корреляцией.

Приемник может использовать данные альманаха, обеспечиваемые системой SBAS, для вхождения в связь.

Приемник должен исключать из решения навигационной задачи, спутники, если они помечены SBAS признаком «Не использовать». Если используется предоставляемые SBAS данные о целостности, то приемнику не требуется исключать спутники GPS на основании предоставляемого GPS признака неисправности (health flag).

При выполнении операции точного захода на посадку приемник должен рассчитывать и применять долгосрочные поправки, быстрые поправки, поправки к скорости изменения дальности и передаваемые ионосферные поправки; для решения навигационной задачи применять метод наименьших квадратов; использовать тропосферную модель, остаточная погрешность которой имеет среднее значение (μ) меньше 0,15 м и стандартное отклонение меньше 0,07 м.

При выполнении операции точного захода на посадку приемник должен рассчитывать и применять уровни защиты по горизонтали и по вертикали. Алгоритмы расчета приведены в соответствующем разделе.

При операциях взлет, полет на маршруте, в зоне аэропортов и неточном заход на посадку в приемнике должны рассчитываться и применяться долгосрочные поправки, быстрые поправки, поправки к скорости изменения дальности, ионосферные и тропосферные поправки. Для учета тропосферных поправок должна использоваться модель тропосферы, остаточная погрешность которой имеет среднее значение (μ) меньше 0,15 м и стандартное отклонение меньше 0,07 м.

При операциях взлет, полет на маршруте, в зоне аэропортов и неточном заход на по

садку в приемнике должны рассчитываться и применяться уровни защиты по горизонтали и по вертикали. Алгоритмы расчета приведены в соответствующем разделе.

Приемник GNSS, взаимодействующий с системой наземного функционального дополнения (GBAS).

Приемник должен обеспечивать прием и обработку сигналов поступающих с GBAS по ОВЧ линии передачи данных и навигационных спутников в соответствии с требованиями и рекомендациями стандартов и рекомендуемой практики ИКАО.

Приемник должен обеспечивать среднеквадратическое значение (RMS) полного вклада бортовой погрешности в погрешность скорректированной псевдодальности, определяемое соотношением:

$$RMS_{pr-air}(\theta_n) \leq a_0 + a_1 \times \exp(-\theta_n/\theta_0), \quad (10.1)$$

где:

n - n -й дальномерный источник;

θ_n - угол места n -го дальномерного источника;

a_0 , a_1 , θ_0 - параметры для спутников GPS, зависящие от класса воздушного судна приведены в таблице 10. 1 (для спутников ГЛОНАСС эти коэффициенты разрабатываются).

Выражение (10. 1) не включает ошибку измерения, вызванную многолучевостью от корпуса воздушного судна.

Таблица 10. 1. Коэффициенты для расчета требований к точности бортового оборудования GPS

Обозначение класса точности воздушного судна	θ_n (градусы)	θ_0 (градусы)	a_0 (м)	a_1 (м)
А	≥ 5	6.9	0.15	0.43
В	≥ 5	4.0	0.11	0.13

Приемник должен использовать данные сообщений GBAS только в случаях:

если подтвержден CRC сообщения;

если идентификатор блока данных (МБИ) содержит битовую последовательность «1010 1010»;

если значение показателя непрерывности/целостности (GCID) GBAS при выборе RPDS до начала заключительных этапов захода на посадку соответствует 1, 2, 3 или 4.

Приемник должен использовать только блоки измерений от дальномерного источника с совпадающими модифицированными Z-отсчетами. При заключительных этапах точного захода на посадку используются блоки измерений, полученные в последние 3,5 секунды и игнорируются любые изменения в GCID.

В приемник должны применяться поправки к псевдодальностям только из последнего полученного набора поправок. Если число полей измерений в последнем полученном сообщении типа 1 указывает, что оно не содержит никаких блоков измерений, то приемник, не применяет поправки GBAS для измерений данного типа.

Приемник должен исключать из решения навигационной задачи любой дальномерный источник, для которого σ_{pr_gnd} в сообщении типа 1 содержит битовую последовательность «1111 1111».

Приемник не должен обеспечивать вертикального наведения, если принятое перед началом заключительных этапов захода на посадку значение параметра FASVAL в сообщении типа 4 содержит битовую последовательность «1111 1111».

Приемник не должен обеспечивать управление заходом на посадку, если принятое перед началом заключительных этапов захода на посадку значение параметра FASLAL в сообщении типа 4 содержит битовую последовательность «1111 1111».

В ходе заключительных этапов захода на посадку приемник должен игнорировать изменения в значении данных FASLAL и FASVAL.

Приемник должен использовать данные FAS, подтвержденные CRC FAS для этих данных.

Приемник должен использовать сообщения, для которых идентификатор ID GBAS (в заголовке блока сообщения) соответствует ID GBAS в заголовке сообщения типа 4, которое содержит выбранные данные FAS.

Для ограничения погрешностей вклада бортового оборудования в скорректированную псевдодальность приемник должен вычислять для каждого навигационного спутника, используемого для решения навигационной задачи параметр $\sigma_{receiver}$, учитывая функцию плотности вероятности остаточной погрешности определения псевдодальности до воздушного судна.

В бортовом оборудовании воздушного судна должны производиться вычисления порогов срабатывания сигнализации по вертикали и по боку (целостность), используя передаваемые GBAS по ОВЧ линии передачи данных параметры: σ_{pr_gnd} (в сообщении GBAS типа 1), σ_N (неоднозначность рефракции в сообщении GBAS типа 2), h_0 (масштаб высоты в сообщении GBAS типа 2), $\sigma_{vert_ion_gradient}$ (в сообщении GBAS типа 2), $B_{i,1} - B_{i,4}$ (параметры целостности; в сообщении GBAS типа 1); вместе с параметром σ_{pr_air} . Если значение параметра $B_{i,j}$

содержит битовую последовательность «1000 0000», указывающую на непригодность данного измерения, то должно приниматься значение $V_{i,j}$ равное нулю.

В бортовом оборудовании воздушного судна должны проверяться условия: вычисленные уровни защиты по вертикали и по боку должны быть меньше, чем требуемые пороги срабатывания сигнализации по вертикали и по боку.

В приемнике должны использоваться только данные спутников, для которых признак IOD, передаваемый GBAS в сообщении типа 1 совпадает с IOD основной орбитальной системы для времени и эфемерид, используемых при расчетах.

В приемнике должны производиться вычисления CRC (циклический избыточный код) эфемерид для каждого дальномерного источника основной орбитальной системы (систем), используемой для определения местоположения. Вычисленное значение CRC должно сопоставляться со значением нового переданного в сообщении типа 1 CRC эфемерид в пределах одной секунды с момента приема. Приемник должен прекращать использование любого спутника, для которого вычисленное и переданное значения CRC не совпадают.

Приемник должен вырабатывать предупреждение, если в течение последних 3.5 секунд не было получено никакого сообщения типа 1.

В приемнике измеренные псевдодальности для каждого спутника должны сглаживаться с использованием измерений на несущей частоте и сглаживающего фильтра, выработанные данные которого отклоняется менее чем на 0,1 метра за 200 секунд относительно характеристики в установившемся режиме при наличии дрейфа между фазой кода и интегрированной фазой несущей вплоть до скорости 0,01 м/с.

Приемник должен удовлетворять требованиям к помехоустойчивости, приведенными в стандартах и рекомендуемой практике ИКАО и специальным требованиям пользователей, если они имеются.

Приемник должен сопрягаться с приемником ОВЧ-диапазона, примененным для приема сообщений GBAS.

К приемнику также предъявляются специальные требования по условиям эксплуатации, надежности, дизайну и другие.

10.2. Обобщенная функциональная схема аппаратуры потребителя

В аппаратуре потребителя производится определение пространственных координат, скорости, времени и других навигационных параметров объекта, на котором она установлена по информации, поступающей с навигационного спутника.

В настоящее время многие фирмы производят аппаратуру потребителя, в том числе и для авиационных пользователей.

Как правило, имеющаяся аппаратура функционирует по сигналам навигационных спутников GPS и по сигналам навигационных спутников GPS и ГЛОНАСС. Обобщенная функциональная схема аппаратуры потребителя изображена на рис. 10.1.

Функционирование аппаратуры потребителя осуществляется в общем виде следующим образом.

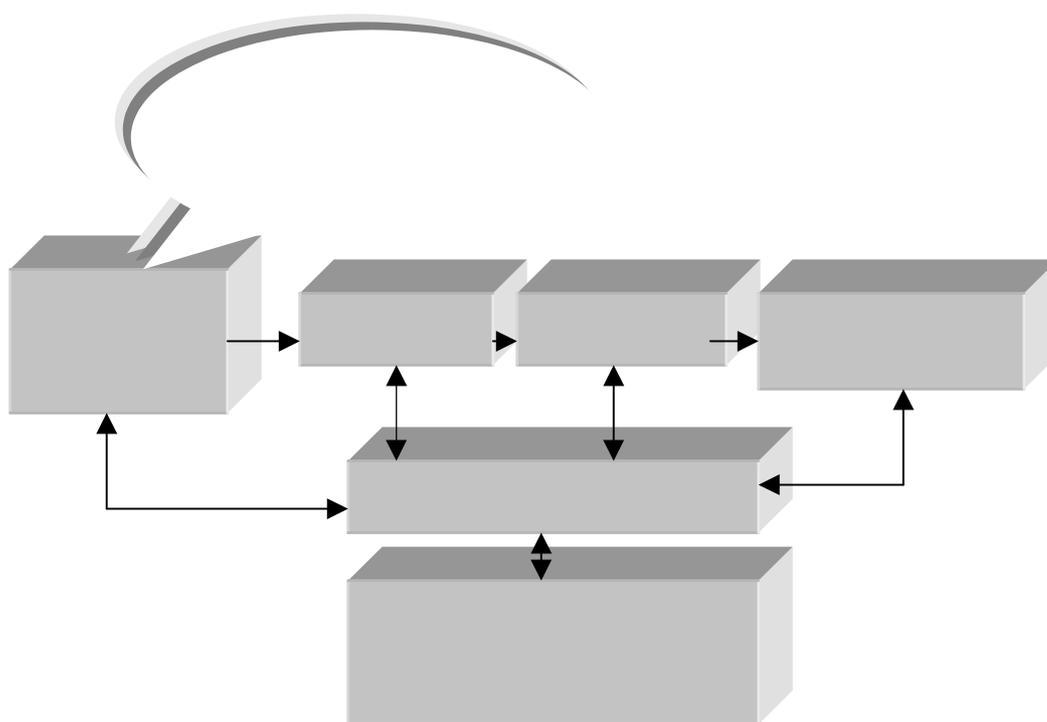


Рис.10.1. Обобщенная схема аппаратуры потребителя

Сигналы навигационных спутников, как правило, GPS и ГЛОНАСС принимаются антенной, усиливаются и поступают на вход приемника.

В приемнике сигналы переносятся с несущей частоты на промежуточную и с помощью аналого-цифрового преобразователя преобразуются в цифровую форму.

В корреляторе цифровые сигналы формируются в виде определенных цифровых отсчетов, которые являются основой для реализации алгоритмов поиска сигналов по задержке, частоте, слежение за спутниками и выделение навигационных сообщений.

Навигационный вычислитель реализует управление составляющих аппаратуры потребителя в целом и осуществляет вычислительные процедуры для первичной и вторичной обработки сигналов.

Интерфейс осуществляет взаимодействие составляющих аппаратуры потребителя с внешними устройствами и между собой.

10.3. GNSS антенны

В аппаратуре потребителей, как правило, применяются антенны на несимметричной полосковой линии. Подобные антенны достаточно широко освещались в литературе с позиций их использования в качестве излучателей плоских антенных решеток. Однако данных по их проектированию для спутниковых навигационных систем недостаточно.

Антенна GNSS должна работать в диапазоне частот 1563 МГц, ..., 1615 МГц, принимать сигналы из верхней полусферы в телесном угле $\pm 85^\circ$, иметь правостороннюю круговую поляризацию с коэффициентом эллиптичности менее 3,5 дБ, обеспечивать коэффициент усиления в секторе $\pm 75^\circ$ больше минус 2 дБ, в секторе $\pm(80^\circ, \dots, 85^\circ)$ – больше минус 7 дБ. Кроме того, она должна иметь структуру для пространственного ослабления электромагнитных колебаний, отраженных от местных предметов, частотно-избирательные элементы для подавления внеполосных излучений и малошумящий усилитель мощности.

Полосковая резонаторная антенна (ПРА) изображена на рис.10. 2 и представляет собой полосковый проводник (1), расположенный над металлической плоскостью (2) и диэлектрическим основанием (3) и в определенном месте, соответствующем точке возбуждения круговой поляризации, соединенный с выходной линией передачи (4).

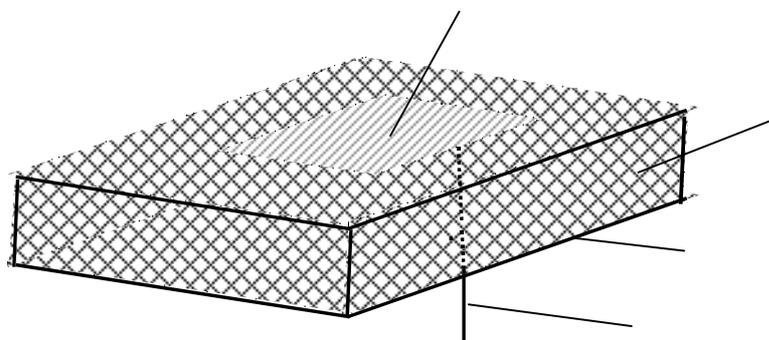


Рис.10.2. Полосковая резонаторная антенна

Принцип действия ПРА состоит в следующем. Объем, заключенный между полосковым проводником и металлической плоскостью, представляет собой резонатор электромагнитных колебаний. При соответствующем возбуждении в резонаторе возникают электромагнитные колебания вдоль продольной и поперечной осей. При выборе размеров полоскового проводника близких к половине длины волны каждая пара противоположных «щелей» (области перпендикулярные металлической плоскости, ограниченные кромками полоскового проводника) создает условия излучения электромагнитных волн в верхнюю полусферу над полосковым проводником.

Если между электрическими составляющими продольных и поперечных колебаний создать фазовый сдвиг 90° , то излучаемое электромагнитное поле будет иметь поляризацию, близкую к круговой.

Для расчета параметров пассивной антенны была разработана электродинамическая модель, включающая в себя:

параметры диэлектрической подложки (ϵ_r - диэлектрическая проницаемость материала, h - толщина подложки);

геометрические размеры полоскового проводника;

местоположение точки возбуждения круговой поляризации;

длину волны электромагнитных колебаний (λ_0);

частотную зависимость входного сопротивления и прочие составляющие.

Модель позволяет определить геометрические размеры ПРА, диаграммы направленности, коэффициент направленного действия, сопротивление излучения, коэффициент связи между резонаторами, а также осуществлять компьютерную «настройку» антенны.

При построении модели ПРА со стороны возбуждения рассматривалась как два включенных друг за другом резонатора связанных между собой через реактивный элемент. Входные проводимости резонаторов определялись из соотношений

$$Y_{вх}(m) := \frac{1}{Z_0} \cdot \left[\begin{array}{l} \left[\frac{Z_0 + i \cdot Z_H \cdot \tan \left[k_0 \cdot b(m) \cdot \lambda_0 \cdot \frac{(1+C)}{2} \right]}{Z_H + i \cdot Z_0 \cdot \tan \left[k_0 \cdot b(m) \cdot \lambda_0 \cdot \frac{(1+C)}{2} \right]} \right] + \dots \\ + \left[\frac{Z_0 + i \cdot Z_H \cdot \tan \left[k_0 \cdot b(m) \cdot \lambda_0 \cdot \frac{(1-C)}{2} \right]}{Z_H + i \cdot Z_0 \cdot \tan \left[k_0 \cdot b(m) \cdot \lambda_0 \cdot \frac{(1-C)}{2} \right]} \right] \end{array} \right] \quad , (10. 1)$$

$$Y_{1вх}(m) := \frac{1}{Z_{10}} \cdot \left[\begin{array}{l} \left[\frac{Z_{10} + i \cdot Z_{1H} \cdot \tan \left[k_0 \cdot w(m) \cdot \lambda_0 \cdot \frac{(1+C_1)}{2} \right]}{Z_{1H} + i \cdot Z_{10} \cdot \tan \left[k_0 \cdot w(m) \cdot \lambda_0 \cdot \frac{(1+C_1)}{2} \right]} \right] + \dots \\ + \left[\frac{Z_{10} + i \cdot Z_{1H} \cdot \tan \left[k_0 \cdot w(m) \cdot \lambda_0 \cdot \frac{(1-C_1)}{2} \right]}{Z_{1H} + i \cdot Z_{10} \cdot \tan \left[k_0 \cdot w(m) \cdot \lambda_0 \cdot \frac{(1-C_1)}{2} \right]} \right] \end{array} \right] \quad , (10. 2)$$

где:

Z_0, Z_{10} - волновые сопротивления несимметричной полосковой линии с длиной и шириной полоскового проводника (рис. 10. 2) и соответствующими параметрами подложки,

K_0 - волновой коэффициент,

$b(m), w(m)$ - относительные длина и ширина полоскового проводника.

Z_n, Z_{1n} - сопротивления излучения ортогональных щелей.

C, C_1 - параметры включения сечения возбуждения ПРА относительно центра полоскового проводника,

m - параметр принимающий дискретные значения при расчете характеристик в полосе частот.

Входное сопротивление ПРА, коэффициент эллиптичности, коэффициент отражения входа и коэффициент стоячей волны определены следующим образом:

$$Z_{вх}(m) := (Y_{вх}(m))^{-1} \quad Z_{1вх}(m) := (Y_{1вх}(m))^{-1} \quad , (10. 3)$$

$$Z(m) := \frac{Z_{вх}(m) \cdot (Z_{1вх}(m) + 1i \cdot X)}{Z_{вх}(m) + Z_{1вх}(m) + 1i \cdot X} \quad , (10. 4)$$

$$E(m) := \left| \frac{1i \cdot X + Z_{1вх}(m)}{Z_{1вх}(m)} \right| \quad , (10. 5)$$

$$S_{11}(m) := \frac{Z_L - Z(m)}{Z_L + Z(m)} \quad , (10. 6)$$

$$КСВН(m) := \frac{1 + |S_{11}(m)|}{1 - |S_{11}(m)|} \quad , (10. 7)$$

где:

Z_L - волновое сопротивление линии, возбуждающей ПРА,

X - реактивное сопротивление элемента связи.

При расчете характеристик ПРА по выражениям (10. 1-10. 7) использовались работ [21 - 27] для функции излучения полоскового излучателя:

$$f_1(\theta, \phi) := \left(\frac{\cos\left(\pi \cdot \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(\phi)}{2 \cdot \sqrt{\epsilon_f}}\right)}{\sin(\theta)^2 \cdot \cos(\phi)^2 - \epsilon_f} \right)^2 \cdot \left[\frac{\sin\left[w \cdot k_0 \cdot \left(\sin(\theta) \cdot \frac{\sin(\phi)}{2}\right)\right]}{w \cdot k_0 \cdot \left(\sin(\theta) \cdot \frac{\sin(\phi)}{2}\right)} \right]^2 \quad (10. 8)$$

$$f_2(\theta, \phi) := \frac{\cos(\theta)^2 \cdot \sin(\phi)^2}{(\epsilon_r - \sin(\theta)^2) \cdot \left(\cot\left(h \cdot k_0 \cdot \sqrt{\epsilon_r - \sin(\theta)^2}\right)\right)^2 + \cos(\theta)^2} \quad , (10. 9)$$

$$f_3(\theta, \phi) := \frac{\cos(\theta)^2 \cdot \cos(\phi)^2 \cdot (\epsilon_r - \sin(\theta)^2)}{(\epsilon_r - \sin(\theta)^2) + (\epsilon_r)^2 \cdot \cos(\theta)^2 \cdot \left(\cot\left(h \cdot k_0 \cdot \sqrt{\epsilon_r - \sin(\theta)^2}\right)\right)^2} \quad , (10. 10)$$

$$F := \left[\frac{120}{(Z_0)^2 \cdot \pi} \cdot \varepsilon_{\text{ef}} \int_0^{2 \cdot \pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} f_1(\theta, \phi) \cdot (f_2(\theta, \phi) + f_3(\theta, \phi)) \cdot \sin(\theta) d\theta d\phi \right]^{-1}, \quad (10. 11)$$

где:

θ, ϕ - углы места и азимута соответственно,

ε_{ef} - эффективная диэлектрическая проницаемость несимметричной полосковой линии,

F - сопротивление излучения ПРА с линейной поляризацией.

Отметим, что подынтегральное выражение в (10. 11) описывает объемную диаграмму направленности ПРА с линейной поляризацией.

Адекватность модели была проверена на антенне фирмы AMOTECN Co.,Ltd., имеющей следующие паспортные значения параметров: средняя частота 1582 ± 3 MHz, полоса пропускания ± 7.5 MHz (минимальная), КСВН 1.5 (максимальный), коэффициент эллиптичности 1.5 дБ (максимальный), коэффициент усиления 5 дБ (при излучении по нормали), минус 1 дБ (при излучении $\pm 80^\circ$ от нормали), диэлектрическая проницаемость подложки 20.5 ± 0.5 , высота подложки 4.1 мм, длина и ширина полоскового проводника 20.8 и 20.8 мм соответственно, точка возбуждения круговой поляризации 2.6 ± 0.1 мм, длина катета проекции плоскости связи 1.8 мм.

Расчитанные по модели параметры этой антенны изображены на рис.10. 3 и 10. 4.

Отметим, что полосе пропускания ± 7.5 MHz соответствует значение относительной частотной расстройки $\delta(m)$ равное ± 0.0047 . Как следует из представленных результатов, имеет место достаточно близкое соответствие между исходными и полученными данными. Отметим также, что, как правило, расчетные соотношения для антенн имеют точность 1, ..., 5%, а в силу того, что материалы, применяемые для изготовления антенн имеют разброс электрофизических параметров, проектирование антенн связано со значительным объемом макетирования.

Изложенное выше дает основание для применения модели для исследования ПРА. Исследования модели ПРА выявили следующее:

с увеличением толщины подложки расширяется полоса пропускания антенны, как с линейной, так и с круговой поляризацией,

с увеличением диэлектрической проницаемости расширяется диаграмма направленности антенны при углах θ больших $\pm 60^\circ$,

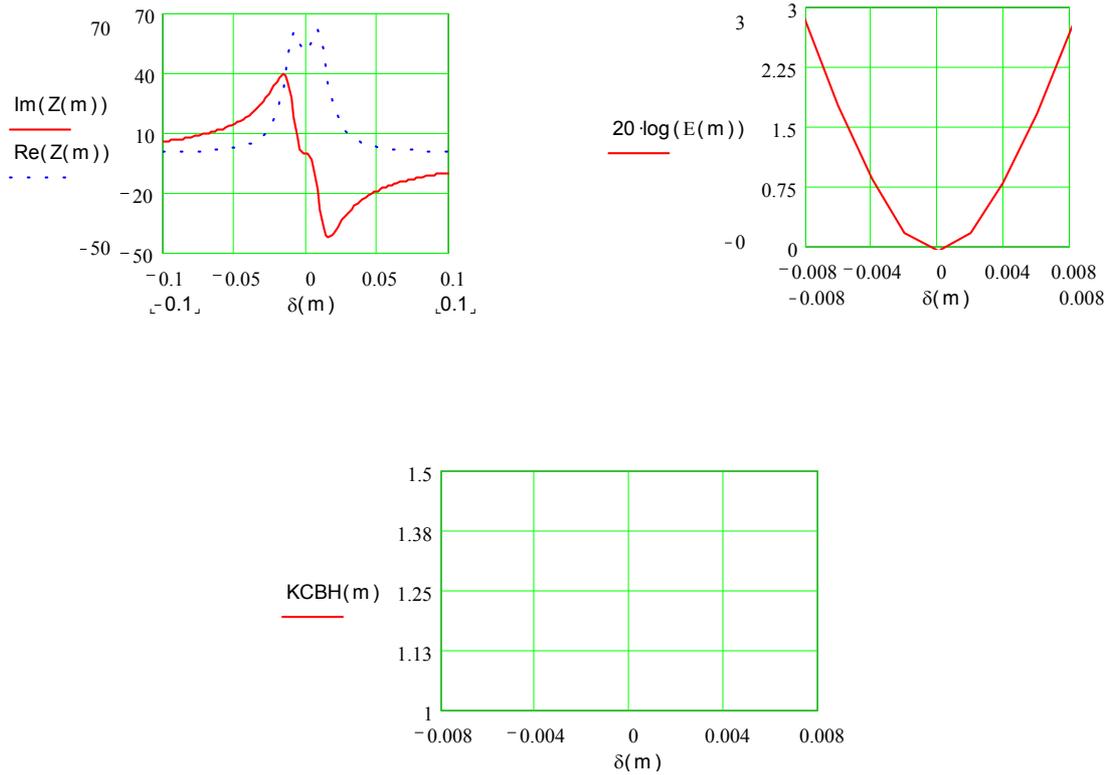


Рис. 10. 3. Частотные характеристики микрополосковой антенны

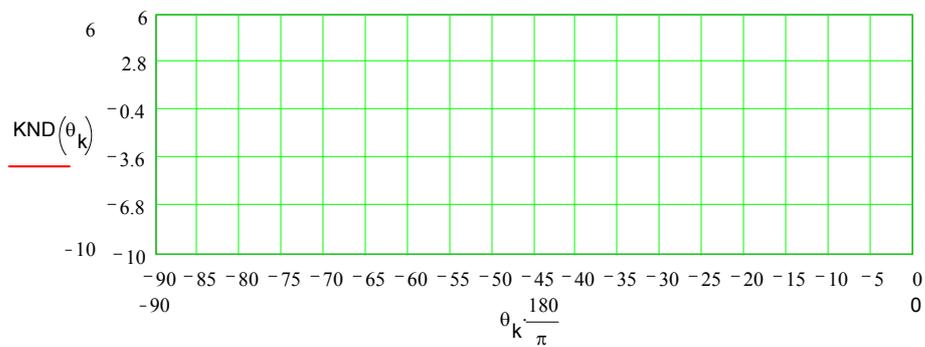


Рис. 10. 4. КНД (в дБ) микрополосковой антенны с круговой поляризацией

ширина полосы пропускания антенны с круговой поляризацией существенно уже полосы пропускания антенны с линейной поляризацией,

форма полоскового проводника должна быть «почти квадратная» со скосами перпендикулярными одной из диагоналей полоскового проводника.

После оценочных расчетов, заключающихся в расчете волновых сопротивлений линий, выборе размеров поперечных сечений линий из условий существования и возбуждения в по

лосковом резонаторе низших типов колебаний (01 и 10 соответственно) было проведено компьютерное проектирование антенны GNSS, в которой в качестве диэлектрической подложки использовался диэлектрик типа фторопласт-4.

Характеристики получены при следующих исходных и рассчитанных параметрах:

средняя рабочая частота 1.595 ГГц;

диэлектрическое основание-подложка из фторопласта-4;

высота диэлектрического основания $h=5\text{мм}$;

геометрические размеры полоскового проводника $w=66.3\text{мм}$, $b=66.3\text{мм}$;

волновое сопротивление линии с геометрическими размерами $w=66.3\text{мм}$, $b=66.3\text{мм}$ - $Z_0=16.6\text{ Ом}$;

сопротивление излучения -485 Ом ;

коэффициенты укорочения при w и b - 0.4895.

Результаты компьютерного проектирования антенны при относительной частотной расстройке $\delta(m)$, соответствующей требуемой полосе пропускания 1563,...,1615 МГц и равной ± 0.02 приведены на рис. 10. 5 и 10. 6.

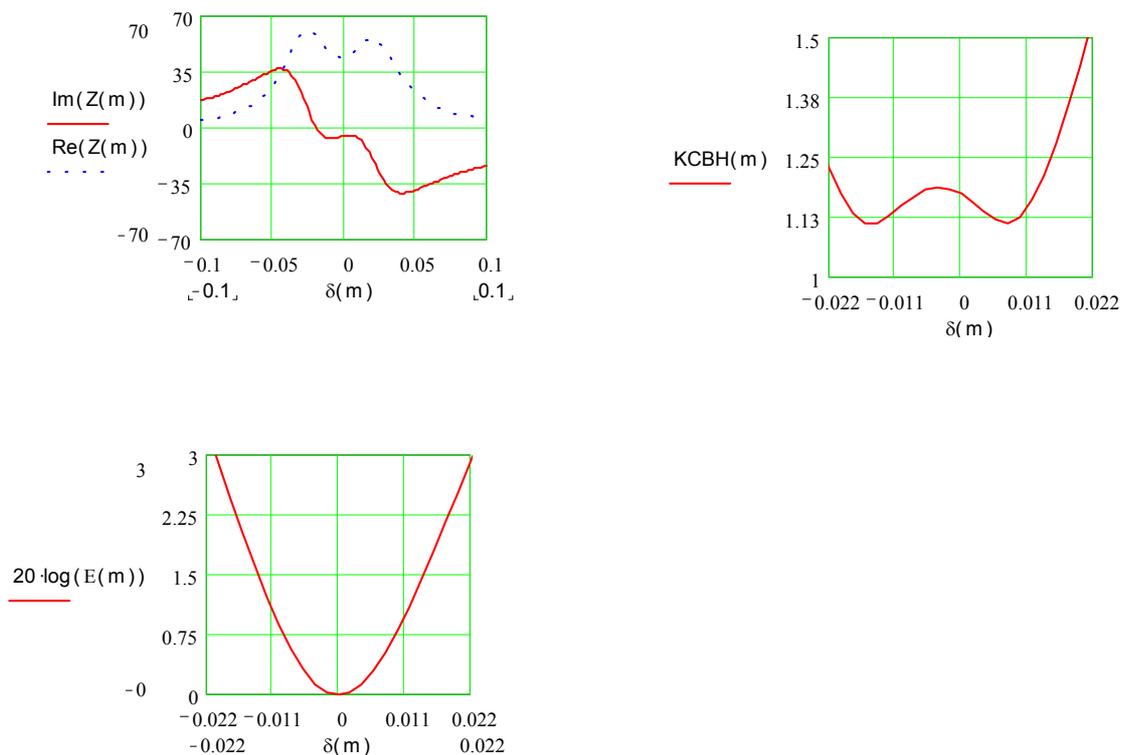


Рис.10. 5 Зависимости характеристик антенны от относительной частотной расстройки

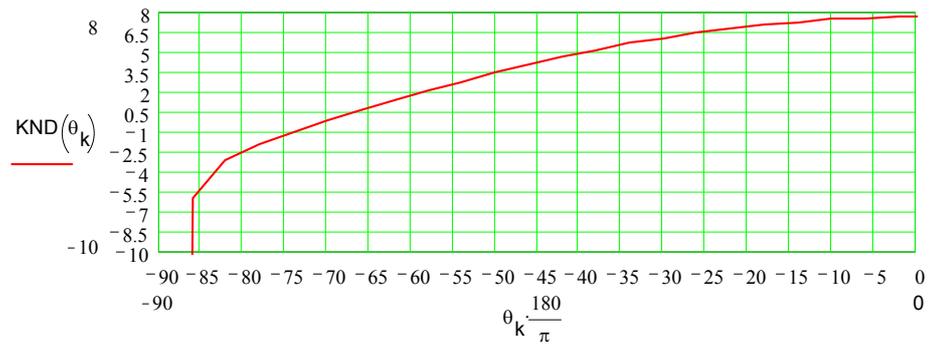


Рис.10. 6. КНД (в дБ) антенны с круговой поляризацией

Анализ численных значений, приведенных выше финальных результатов проектирования, а также учет многих промежуточных результатов позволил заключить, что антенна в целом отражает требования, изложенные выше.

Структура подавления многолучевости предназначена для ослабления сигналов отраженных от объектов, находящихся в зоне видимости антенны. Для пояснения необходимости применения данного функционального элемента обратимся к рис.10. 7.

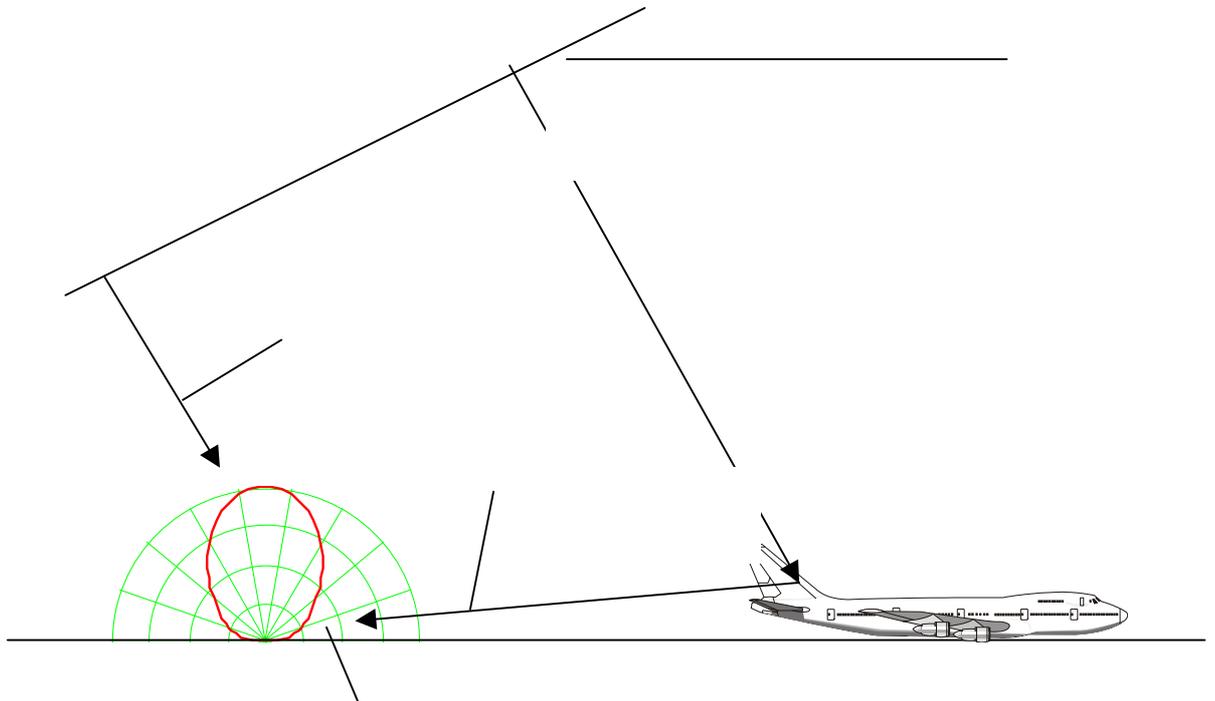


Рис.10. 7. Схема воздействия прямого и отраженного сигналов на антенну

В силу того, что навигационные спутники находятся на высоте около 20000 км, излучаемые или электромагнитные колебания достигнут поверхности земли в виде плоских электромагнитных волн. Электромагнитные волны поступают в антенный тракт как в виде прямых волн, из которых извлекается требуемая информация, так и в виде волн отраженных от предметов окружающих антенну (рис. 10. 7).

В результате в тракте антенны имеет место векторное сложение полезного и мешающего электромагнитного колебания (рис. 10. 8), что приводит к дополнительным ошибкам при навигационных расчетах.

Из рис. 10. 8 видно, что, например, электрическая составляющая отражений электромагнитной волны может прийти с любой амплитудой, поляризацией и фазой и привести к амплитудно-фазовому изменению прямой электромагнитной волны.

Существует несколько мер для ослабления этого явления: выбор места размещения антенны, установление специальных отражающих или поглощающих щитов, формирование специального рельефа местности вокруг антенны, формирование диаграммы направленности антенны специальной формы.

Оценим влияние многолучевого распространения следующим образом.

Будем полагать антенна ККС не должна принимать электромагнитные колебания в

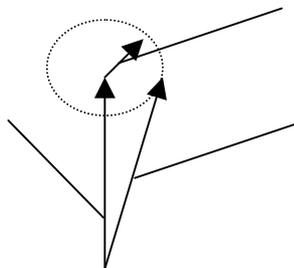


Рис. 10. 8. Механизм взаимодействия полезного и мешающего сигналов

секторе $+5^\circ$ и ниже от линии горизонта. Сигналы, отраженные от местных предметов можно рассматривать как электромагнитные волны вторичных источников излучения. В этом случае к антенне GNSS и вторичному источнику излучения можно применить формулу «идеальной радиопередачи» между двумя антеннами и оценить степень воздействия интенсивности сигнала вторичного источника на прямой сигнал поступающей с навигационного спутника.

Развязка между антенной ККС и вторичным источником в предположении, что они находятся над идеально проводящей поверхностью, выраженная в децибелах записывается выражением

$$X_{\text{разв}} = G_1 [\text{дБ}] + G_2 [\text{дБ}] + \Phi [\text{дБ}] + P [\text{дБ}],$$

где:

G_1 - коэффициент усиления пассивной антенны GNSS,

G_2 - коэффициент усиления антенны вторичного источника,

$$\Phi = 20 \lg \frac{\lambda}{4\pi R} \text{ пространственный фактор}$$

P - поляризационный фактор,

λ - длина волны,

R - расстояние между антеннами.

Полагая, что антенна вторичного источника изотропный излучатель ($G_2 [\text{дБ}] = 0$), поляризационный фактор $P [\text{дБ}] = 0$ видим, что, например, параметр развязки зависит от коэффициента усиления пассивной антенны ККС в направлении приема сигнала вторичного источника, длины волны и расстояния между антенной ККС и вторичным источником излучения. На рис. 10. 9 приведена зависимость $\Phi (R)$ при $\lambda = 0,19$ м (R дано в метрах).

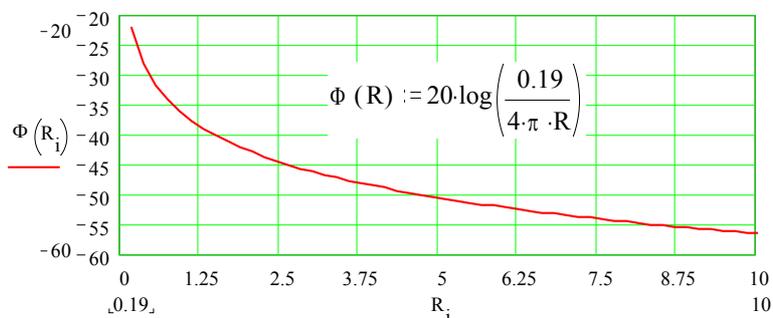


Рис.10. 9. Зависимость пространственного фактора от расстояния между антенной ККС и вторичным источником излучения

В силу того, что зависимость на рис. 10. 9 отражает характер интенсивности мешающего сигнала приходящего с одного направления, а антенна в азимутальной плоскости всенаправленная величина развязки может изменяться в худшую сторону, поскольку любая неровность поверхности соизмеримая с длиной волны будет являться вторичным источником излучения. Поэтому вблизи антенны GNSS целесообразно установить специальную периодическую структуру, увеличивающую абсолютные значения развязки. Эффективные действия такой структуры будут проявляться на расстояниях порядка двух длин волн от фазового

центра антенны. Увеличение развязки можно ожидать на 5-10 дБ и окончательная величина может быть определена только экспериментальным путем.

Периодическая структура изображена на рис. 10. 10. Принцип действия структуры состоит в следующем. Электромагнитная волна 1, распространяющаяся в направлении антенны, на ребрах структуры разделяется на составляющие 2 и складывается с 1 в противофазе. В результате периодического повторения результирующий сигнал поступающий в антенну ослабляется. Внешний вид антенны с периодической структурой приведен на рис. 10. 10. В структуре высота ребер выбрана около четверти длины волны, диаметр структуры- 400 мкм.

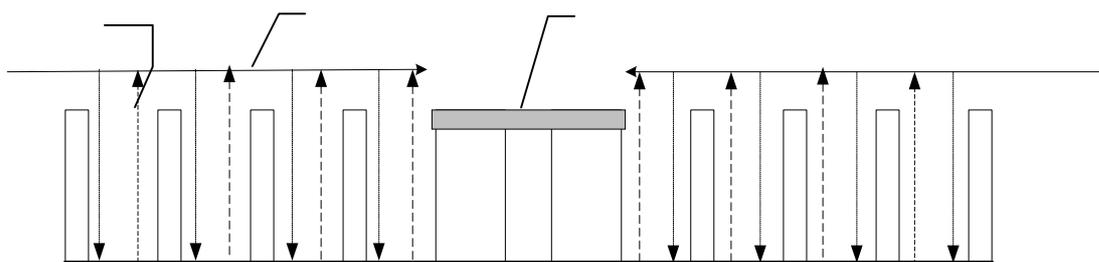


Рис.10. 10. Антенна со структурой подавления многолучевости

В заключении отметим, что изложенный выше материал не исчерпывает возможностей по совершенствованию параметров ПРА. Так возбуждение полоскового излучателя посредством квадратурного мостового устройства позволяет уменьшить коэффициент эллиптичности ПРА. Применение двух полосковых излучателей, расположенных друг над другом дает возможность создать двухдиапазонную антенну для частот L1 и L2. Однако это требует усложнения конструкции и переход на многослойные печатные полосковые линии.

10.4. Приемник

В качестве примера реализации приемника рассмотрим приемник системы ГЛОНАСС с двойным преобразованием частоты (рис. 10. 11)

На входе приемника имеется общий смеситель, на который поступают сигналы СВЧ принятые антенной и сигнал с синтезатора частоты, который в данном случае выполняет роль 1 гетеродина

После переноса в общем смесителе сигналов, принимаемых со всех видимых навигационных спутников на первую промежуточную частоты, их фильтрации и усиления у смесителем первой промежуточной частоты сигналы поступают на смесители i – тых каналов, каждый из которых преобразует частоту только i –го спутника.

На эти же смесители поступают сигналы второго гетеродина, выработанные синтезатором частоты.

Сигналы перенесены на вторую промежуточную частоту, фильтруются, усиливаются усилителями второй промежуточной частоты и наступают на входы аналого-цифровых преобразователей (АЦП).

В АЦП сигналы преобразуются в цифровую форму и поступают для дальнейшей обработки на последующие устройства.

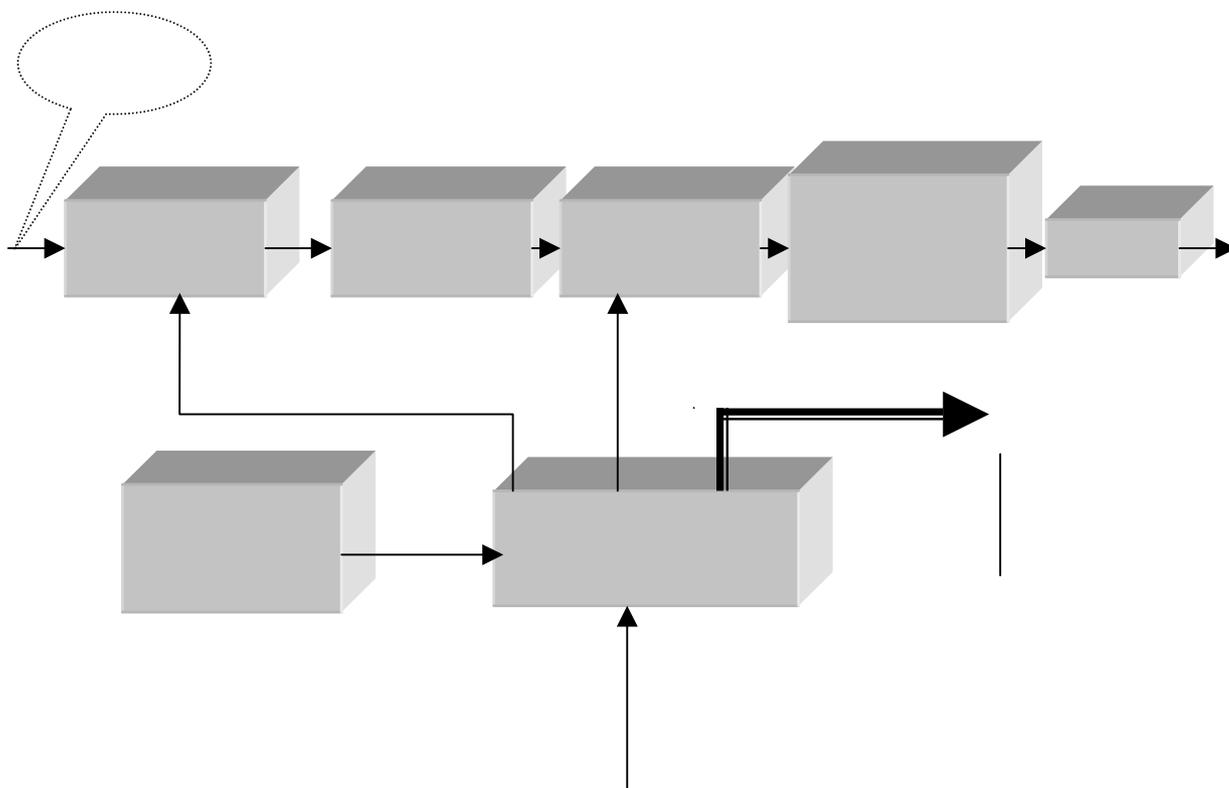


Рис. 10.11. Схема приемника

Следует подчеркнуть, что схемно-технических реализаций приемников может быть достаточно много.

Например, может быть тройное преобразование частоты или одинарное.

Потенциально имеется возможность, когда преобразование сигналов в цифровую форму будет происходить не на промежуточной частоте, а непосредственно на входе приемника (на СВЧ).

В заключении отметим, что одним из важнейших элементов приемника является генератор опорных колебаний, от стабильности частоты, которого зависят точностные характеристики аппаратуры потребителя.

10.5. Схема поиска сигнала навигационного спутника

В спутниковых радионавигационных системах аппаратура потребителя должна осуществлять поиск и обнаружение сигнала и последующее слежение за этим сигналом. Поскольку в зоне видимости всегда находятся несколько навигационных спутников, то указанные процедуры должны выполняться для сигналов этих спутников.

Обнаружение сигналов навигационных спутников аппаратурой потребителя является статистической задачей.

На входе устройства обнаружения сигнала всегда помимо сигнала имеется шумовая составляющая, обусловленная различными факторами.

Сигнал на входе устройства обнаружения можно представить как сумму собственно сигнала $u(t)$ и шума $n(t)$ т.е.

$$x(t) = a \cdot u(t) + n(t)$$

Пусть сигнал $u(t)$ известен, а сообщение “а” нужно определить.

Положим, что сообщение “а” может принимать два значения $a = 0 = a_0$ и $a = 1 = a_1$.

Вероятности присутствия и отсутствия сигнала обозначим $P(a_1)$ и $P(a_0)$ соответственно.

Устройство обнаружения должно проанализировать сигнал $x(t)$ в течение времени T и воспроизвести сообщение «а»

Сигнал $x(t)$ является непрерывной функцией времени и представляет собой случайный процесс.

Если в данном случайном процессе в течении заданного времени T выбрать n значений сигнала $x(t)$ так чтобы $n = T \cdot F$,

где:

$$F = \frac{1}{\Delta t} \text{ ширина спектра сигнала } x(t),$$

Δt – интервал, с которым берутся отсчеты сигнала $x_1 \dots x_n$, то с использованием методов математической статистики, можно оценить наличие или отсутствие параметра «а».

Задача обнаружения сводится к проверке двух статистических гипотез: сигнал «а» во входной смеси есть или сигнала «а» во входной смеси нет.

Для проверки этих гипотез необходимо:

1. Сформировать или выбрать критерий оптимальности, который должен приводить к математическим соотношениям и алгоритмам, поддающимся решению.
2. Реализовать алгоритмы решения радиотехническими средствами.
3. Сопоставить и оценить оптимальность математического аппарата и реального физического устройства обнаружения сигнала.

Под критерием оптимальности будем понимать процедуру, по которой из совокупности устройств обнаружения можно выбрать наилучшее.

Одна из оптимальных схем поиска и обнаружения сигнала изображена на рис. 10.12 [20].

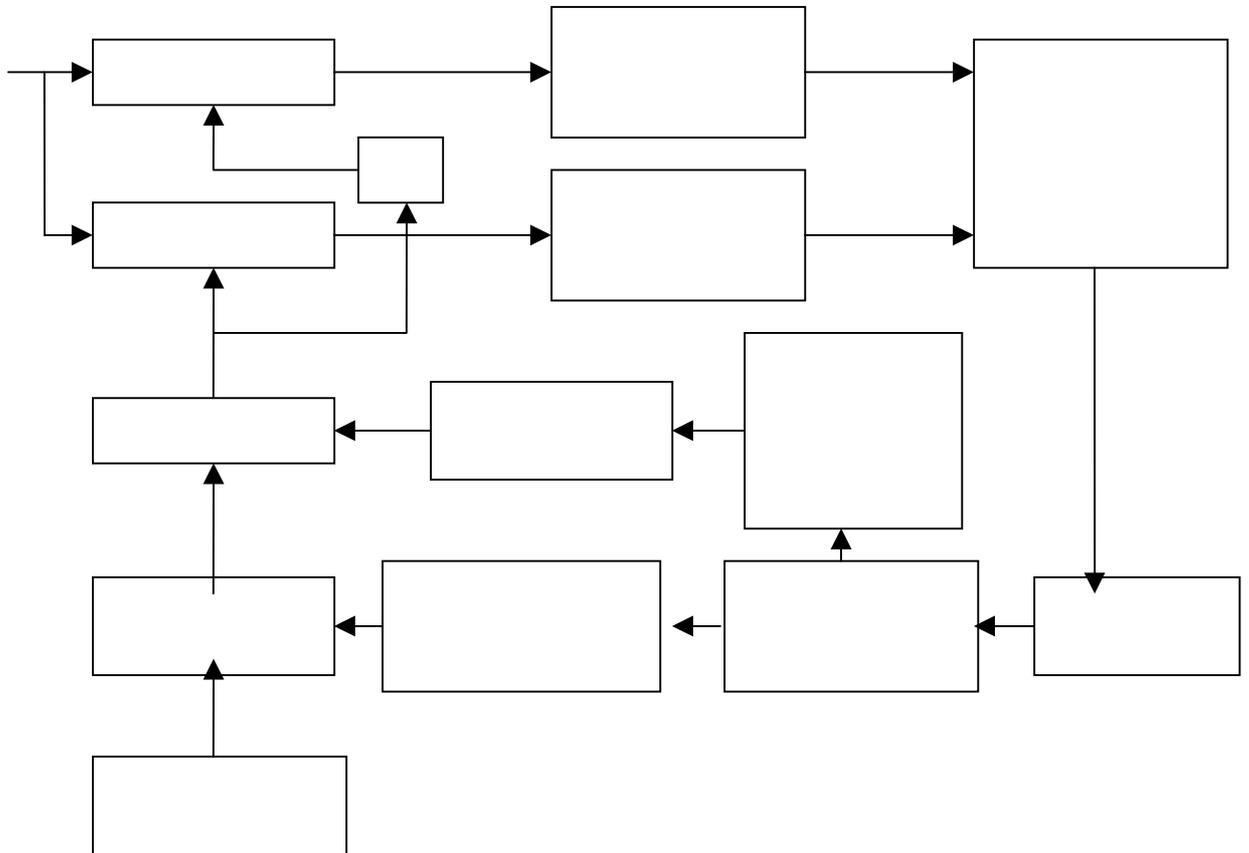


Рис.10.11 Схема системы поиска сигнала

Схема функционирует следующим образом.

Блок управления поиском в зависимости от состояния порогового устройства выдает в блоки управления команды задержки кода и сдвига частоты; синтезатор частоты генерирует опорные колебания, а генератор кода вырабатывает модулирующую последовательность. После первого умножителя вырабатывается колебание

$$\cos(\omega_{снj} * t) * h(t - \tau_i).$$

Это колебание поступает на умножитель 2 и со сдвигом $\pi/2$ на умножитель 3, на оба умножителя поступают сигналы j -го навигационного спутника, перенесенные на промежуточную частоту.

После умножителей 2 и 3 результирующие низкочастотные составляющие поступают на интеграторы I (синфазная составляющая) и Q (квадратурная составляющая).

В интеграторах происходит накопление сигналов и они поступают на сумматор $I^2 + Q^2$.

С сумматора $I^2 + Q^2$ результирующий сигнал направляется в пороговое устройство, которое по заданному критерию принимает решение об обнаружении сигнала и прекращении поиска, либо о продолжении поиска. В последнем случае в блок управления поиском передается соответствующая команда.

После обнаружения сигнала по заданному критерию аппаратура переходит в режим сопровождения сигнала.

Рассмотренная схема является одной из составных частей коррелятора.

10.6. Коррелятор

Один из вариантов коррелятора для канала изображен на рис. 10. 13 [20].

Функционирование коррелятора осуществляется следующим образом. На вход коррелятора (умножители 1,2) поступают из приемника цифровые отсчеты в дискретные моменты времени $t_{k, i}$:

$$Y_{вх} = y(t_{k, i}), \quad (10. 12)$$

где:

$$t_{k, i} = (K_n * T_d) * k + T_d * i$$

$T_d = 1/f_d$ – шаг дискретизации по времени;

f_d – частота дискретизации;

k - индекс соответствующий времени t_k ;

$$t_k = (K_n * T_d) * k ;$$

$K_n = T_n / T_d$ – число накапливаемых отсчетов за время T_n .

Цифровой генератор вырабатывает в цифровом виде сигналы:

$$\cos(2\pi f_n t_{k, i} + \phi_{k, i}), \quad (10. 13)$$

$$\sin(2\pi f_n t_{k, i} + \phi_{k, i}), \quad (10. 14)$$

где f_n – промежуточная частота.

Генератор кода вырабатывает модулирующую функцию стандартного кода дальности

$$h(t_{k, i} - \tau_{k, i}). \quad (10. 15)$$

В выражениях (10. 12 – 10. 14)

$$\tau_{k, i} = \tau_k + \tau_k * i * T_d,$$

$$\phi_{k, i} = \phi_k + \omega_{доп. k} * i * T_d ,$$

$\tau_k, \tau_k, \phi_k, \omega_{доп. k}$ – оценки задержки, скорости изменения задержки, фазы, скорости изменения фазы в соответствующие моменты времени t_k .

Сигнал, выработанный генератором кода проходит через 3- битовый регистр сдвига, в котором формируются последовательности:

$$\text{на выходе } E - h(t_{k, i} - \tau_{k, i} + \tau_0/2);$$

на выходе **P** - $h(t_{k,i} - \tau_{k,i})$;

на выходе **L** - $h(t_{k,i} - \tau_{k,i} - \tau_3/2)$;

где $\tau_3 = \Delta\tau$ - длительность элементарной посылки дальномерного кода, которая, например, для системы ГЛОНАСС $\tau_3 = \Delta\tau = 1/511$ мс, $1/\tau_3 = f_{CT}$ - частота стандартного кода системы ГЛОНАСС.

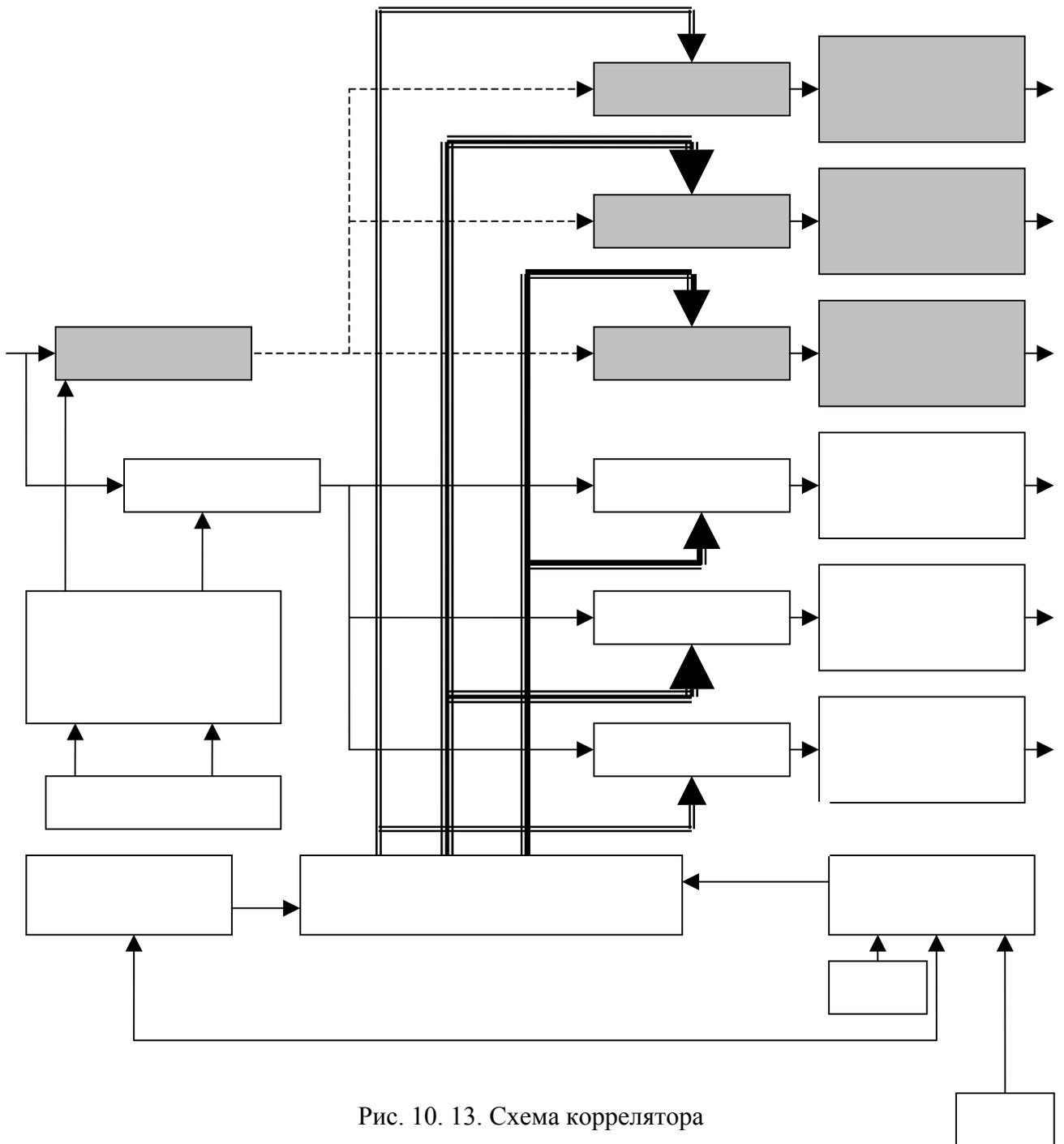


Рис. 10. 13. Схема коррелятора

Трех битовый регистр сдвига обеспечивает формирование опорной кодовой последовательности на выходе **P**, задержанной на $\tau_3/2$ на выходе **L** и опережающей на $\tau_3/2$ на выходе

Е. Приращение времени и задержки фазы за один такт составляют: $\Delta\varphi/T_H$ и $\Delta\tau/T_H$ соответственно.

Таким образом, в результате всех процедур, выполняемых в схеме рис. 10. 12 на выходах сумматоров $I_E, I_P, I_L, Q_E, Q_P, Q_L$ результирующая информация будет иметь вид:

$$I_{E,k+1} = \sum_{i=1}^{K_H} y(t_{k,i}) \cdot h\left(t_{k,i} - \tau_{k,i} + \frac{\tau_3}{2}\right) \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot f_{\Pi} \cdot t_{k,i} + \phi_{k,i}\right)$$

$$Q_{E,k+1} = \sum_{i=1}^{K_H} y(t_{k,i}) \cdot h\left(t_{k,i} - \tau_{k,i} + \frac{\tau_3}{2}\right) \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f_{\Pi} \cdot t_{k,i} + \phi_{k,i}\right)$$

$$I_{L,k+1} = \sum_{i=1}^{K_H} y(t_{k,i}) \cdot h\left(t_{k,i} - \tau_{k,i} - \frac{\tau_3}{2}\right) \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot f_{\Pi} \cdot t_{k,i} + \phi_{k,i}\right)$$

$$Q_{L,k+1} = \sum_{i=1}^{K_H} y(t_{k,i}) \cdot h\left(t_{k,i} - \tau_{k,i} - \frac{\tau_3}{2}\right) \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f_{\Pi} \cdot t_{k,i} + \phi_{k,i}\right)$$

$$I_{P,k+1} = \sum_{i=1}^{K_H} y(t_{k,i}) \cdot h(t_{k,i} - \tau_{k,i}) \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot f_{\Pi} \cdot t_{k,i} + \phi_{k,i}\right)$$

$$Q_{P,k+1} = \sum_{i=1}^{K_H} y(t_{k,i}) \cdot h(t_{k,i} - \tau_{k,i}) \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f_{\Pi} \cdot t_{k,i} + \phi_{k,i}\right)$$

10.7. Демодуляция сообщений навигационных спутников ГЛОНАСС

Демодуляция навигационных сообщений спутников ГЛОНАСС производится в результате вторичной обработки навигационных сигналов. Как отмечалось ранее навигационный сигнал ГЛОНАСС формируется путем преобразования информационных символов в относительный код с частотой следования 50 бит/сек, сложением по модулю 2 с меандром частотой 100 Гц, сложением бидвоичного результирующего сигнала по модулю 2 с кодом стандартной точности (М-последовательностями) и модуляцией несущих частот результирующими последовательностями символов.

При демодуляции радионавигационного сигнала в аппаратуре потребителя необходимо правильно распорядиться всеми составляющими сигнала, чтобы извлечь из него содержательную часть навигационного сообщения.

Одна из схем, реализующая эти процедуры для сигналов ГЛОНАСС изображена на рис. 10. 14 [20].

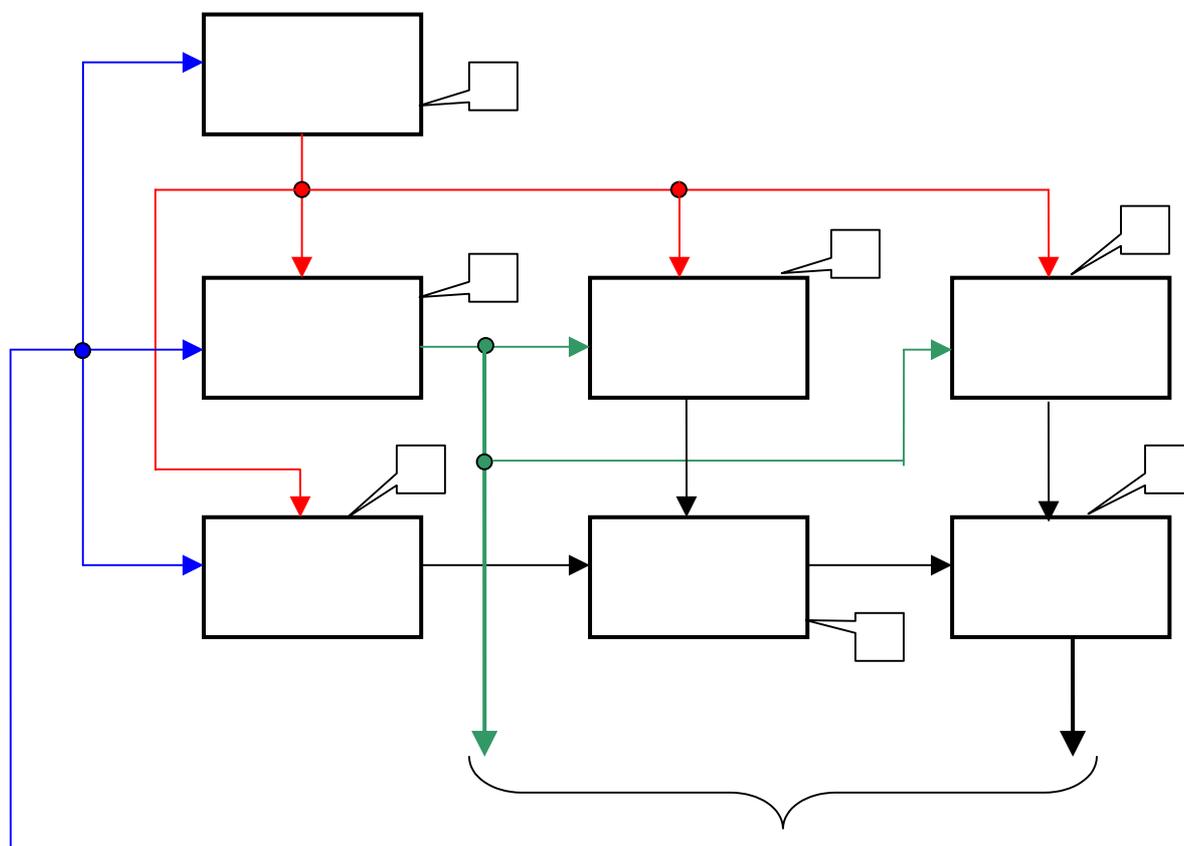


Рис. 10. 14. Схема демодуляции

В приведенной схеме сигнальная информация от коррелятора поступает на первые входы устройств выработки тактовой частоты бидвоичного кода, метки времени, выделения бидвоичного кода.

Тактовые импульсы бидвоичного кода поступают на вторые входы устройств выработки кода метки времени, выделения бидвоичного кода, выработки меандра частоты 100 Гц, выработки сигнальной частоты 50 Гц.

Код метки времени с устройства 2 поступает на первые входы устройств выработки меандра частоты 100 Гц и сигнальной частоты 50 Гц (устройства 4 и 6 соответственно), а также на дешифратор.

Символы бидвоичного кода с выхода устройства 1 и меандровое колебаний частоты 100 Гц с устройства 4 складываются по модулю 2 в сумматоре 5. Результирующий сигнал

есть восстановленный сигнал навигационных данных, переданных со спутника. Он для дополнительного сглаживания поступает на первый вход устройства 7; на второй вход которого поступают импульсы частотой 50 Гц с устройства 6.

С устройства 7 на дешифратор для дальнейшей обработки поступают информационные символы навигационного сообщения длительностью 20 миллисекунд с частотой 50 Гц. На дешифратор также поступают и импульсы кода метки времени с устройства 2.

Синхронизирующие импульсы устройства 3 определяют границы 10 миллисекундных интервалов интегрирования.

Импульсы, вырабатываемые устройством 2, синхронизированы с последним тридцатым импульсом кода метки времени и совпадают с двухсекундной меткой начала/окончания строки информационного сообщения.

10.8. Навигационный вычислитель

Навигационный вычислитель является одним из главных элементов аппаратуры потребителя. В навигационном вычислителе осуществляется решение задач по первичной и вторичной обработке навигационной информации, поступающей со спутников, а также управление потоками информации между составляющими аппаратуры потребителя.

Навигационный вычислитель физически можно разделить на сигнальный и цифровой процессор. Сигнальный процессор осуществляет работу с сигналами при первичной обработке информации. Цифровой процессор выполняет вычислительные процедуры, предусмотренные алгоритмами для проведения навигационных определений.

По своей сути навигационный процессор есть вычислительная машина, работающая в реальном времени.

