

УДК 621.396.96

А. В. Бархатов, А. А. Коновалов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Использование сигналов цифрового эфирного телевидения для определения координат и скорости автомобилей¹

Рассмотрено определение координат и скорости автомобилей пассивным бистатическим радаром, использующим излучение передатчика цифрового эфирного телевидения стандарта DVB-T2, по измерениям бистатических задержки и доплеровского смещения частоты в отсутствие измерений азимута. Проанализированы особенности траекторной обработки бистатических измерений. Приведены результаты траекторного сопровождения автомобилей на Кольцевой автомобильной дороге Санкт-Петербурга.

Радиолокация, пассивный, бистатический, полуактивный, полицейский, радар

С ростом числа источников излучения электромагнитных волн (ЭМВ), таких, как станции теле- и радиовещания, сотовой связи, глобального позиционирования, появляется все больше систем, использующих это излучение для решения радиолокационных задач [1]. Радар, выполняющий обнаружение и измерение координат целей по отраженным от них ЭМВ, которые излучаются сторонним нерадиолокационным источником, в зарубежной литературе называют пассивным бистатическим радаром (ПБР). О происхождении этого названия, сочетающего, на первый взгляд, противоречащие друг другу определения ("пассивный" подразумевает отсутствие передающей части, "бистатический" – наоборот), подробно изложено в [2]².

Рассматриваемая в настоящей статье разновидность ПБР действует следующим образом. На приемной позиции (ПП) принимаются прямой сигнал s_{ref} стороннего источника (СИ) и отраженный от цели сигнал СИ s_{surv} . Вычисляется взаимная функция неопределенности (ВФН) прямого и отраженного сигналов:

$$\chi(\tau_b, f_D) = \int_{-\infty}^{\infty} s_{\text{surv}}(t) s_{\text{ref}}^*(t - \tau_b) e^{-j2\pi f_D t} dt,$$

где t – время; τ_b – временная задержка сигналов ПБР; f_D – доплеровское смещение частоты. Обработкой модуля ВФН $|\chi(\tau_b, f_D)|$ достигается

решение задач обнаружения целей и измерения параметров τ_b, f_D для каждой из них.

Расстояние L (рис. 1) между СИ и ПП (называемое базой) известно, так же, как и азимут СИ (направление на СИ из точки расположения ПП). Если на ПП измеряются азимут и угол места цели, можно вычислить дальность цели:

$$R_r = \frac{(c\tau_b)^2 + 2c\tau_b L}{2[c\tau_b + L(1 - \cos\alpha_r \cos\varepsilon_r)]}, \quad (1)$$

где c – скорость света; α_r – разница азимутов цели и СИ; ε_r – угол места цели³. Выражение (1) справедливо при одинаковых высотах расположения ПП и СИ.

Отметим, что чаще всего угол места на ПП не измеряется. Его можно вычислить, имея значения азимутов и задержек, измеренных для двух разнесенных в пространстве СИ (или для двух ПП при одном СИ). Другой способ – рассчитать дальность, приняв угол места равным нулю, а

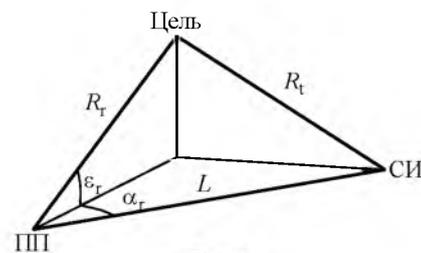


Рис. 1

¹ Статья выполнена в рамках работы "Проведение научно-исследовательских работ" базовой части Государственного задания Минобрнауки России № 2014/187 (код проекта 1031).

² В русскоязычной литературе чаще используется термин "полуактивная РЛС". В настоящей статье применена международная терминология.

³ Индекс "r" указывает на измерения параметров относительно ПП (receiver), индекс "tr" – на измерения относительно СИ (transmitter).

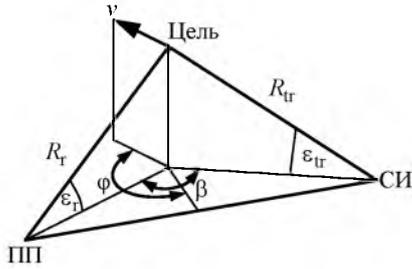


Рис. 2

возникшую ошибку в оценке дальности устранить при траекторной обработке [3].

Доплеровское смещение частоты f_D связано с доплеровской скоростью цели v_D :

$$v_D = f_D \lambda,$$

где λ – длина ЭМВ. При этом доплеровская скорость, равная производной суммарной дальности $R_{tr} + R_r$ по времени (R_{tr} – расстояние от СИ до цели) при движении цели в плоскости, параллельной плоскости расположения СИ и ПП, зависит от скорости цели v следующим образом:

$$v_D = d(R_{tr} + R_r)/dt = v [\cos(\varphi + \beta/2) \cos \varepsilon_{tr} + \cos(\varphi - \beta/2) \cos \varepsilon_r], \quad (2)$$

где φ – угол между направлением движения цели и биссектрисой бистатического угла β ; ε_{tr} – угол места цели относительно СИ (рис. 2). По одному измерению доплеровского смещения частоты нельзя оценить скорость цели, так как неизвестно направление ее движения. Так же, как и угол места, скорость и направление можно оценить, одновременно облучая или наблюдая цель с разных углов (используя два разнесенных в пространстве СИ или две ПП) и измеряя f_D для каждой пары СИ–ПП либо в процессе траекторной обработки.

Натурные измерения. Летом 2013 г. при выполнении экспериментальных исследований в научной работе, проводимой СПбГЭТУ "ЛЭТИ" и финансируемой Минобрнауки РФ и ОАО НИИ "Вектор", на дамбу Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений вывозился

макет ПБР, использующий сигналы цифрового эфирного телевидения (ЦЭТВ) стандарта DVB-T2. Программа экспериментальных исследований предполагала получение отражений от водной поверхности с целью измерения скорости поверхностных течений. Макет ПБР содержал две телевизионные антенны дециметрового диапазона Alcad NEO-085 (рис. 3, а), блок усилителей телевизионного сигнала и полосовых фильтров 35-го телевизионного канала, на котором в Санкт-Петербурге осуществляется вещание ЦЭТВ (рис. 3, б), плату аналого-цифрового преобразования (рис. 3, в) и ноутбук (рис. 3, г). Электропитание макета обеспечивалось от бортовой сети легкового автомобиля.

Географические координаты размещения макета 60.02769 с. ш., 29.84739 в. д. Координаты телебашни Ленинградского радиотелевизионного передающего центра (ЛРТТЦ), на которой расположена передающая антенна ЦЭТВ DVB-T2, 59.976493 с. ш., 30.320956 в. д. Расстояние между СИ и ПП 27 км.

Антенна приема прямого сигнала была направлена в сторону телебашни ЛРТТЦ, вторая антенна, предназначенная для приема отраженных сигналов, – на воду.

На расстоянии приблизительно 40 м от точки, где находилась антенна приема отраженных сигналов, располагается участок Кольцевой автомобильной дороги (КАД) Санкт-Петербурга. Отраженные от движущихся по КАД автомобилей ЭМВ попадали на антенну по заднему и по боковым лепесткам диаграммы направленности.

Уровень боковых и задних лепестков диаграммы направленности антенны Alcad NEO-085 в горизонтальной плоскости согласно документации находится в пределах приблизительно от – 25 до – 35 дБ. Несмотря на вызванное этим заметное ослабление отраженные от автомобилей сигналы уверенно обнаруживались до значений бистатической задержки τ_b чуть больше 3 мкс. Измеренное доплеровское смещение частоты f_D менялось в пределах от – 100 до 100 Гц. Пример ин-

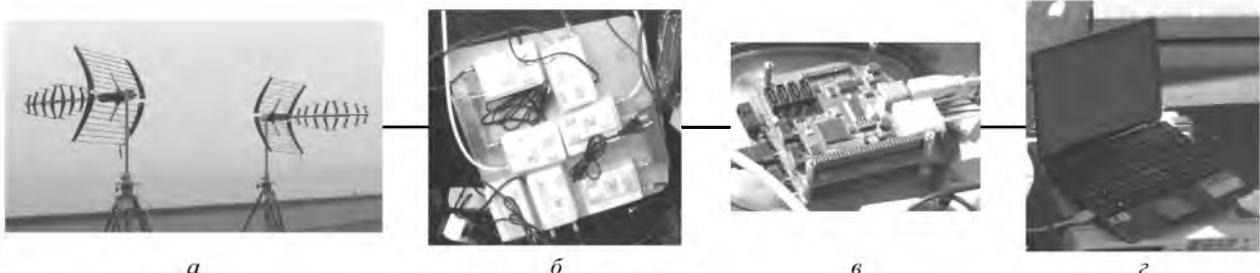


Рис. 3

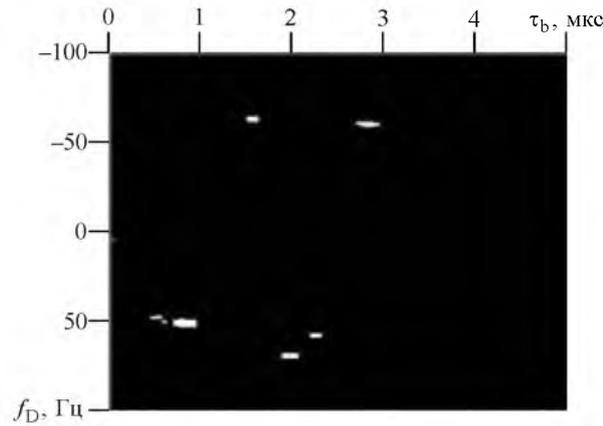


Рис. 4

дикации отражений в координатах "задержка – доплеровское смещение" приведен на рис. 4.

Определение координат и скорости автомобилей. Как отмечено ранее, база ПБР L в рассматриваемом случае составила 27 км. Разницей высот расположения антенн СИ и ПП (антенна ПП находится на земле, передающая антенна ЦЭТВ DVB-T2 – на высоте около 300 м) при таких базе и расстоянии от СИ до цели можно пренебречь: угол падения на антенну ПП и цель близок к прямому. Таким образом, для вычисления расстояния R_T между ПП и автомобилем можно было бы воспользоваться выражением (1), если был бы известен угол α_T (угол места ε_T автомобилей для ПП равен нулю).

Несмотря на то, что азимут (а значит, и угол α_T) не измерялся, координаты цели могут быть определены на основе очевидного факта, что автомобили движутся по дороге. Одному значению бистатической задержки τ_b соответствует множество точек (для которых сумма расстояний до СИ и ПП $R_{IT} + R_T$ постоянна), образующих эллипс с фокусами в точках размещения СИ и ПП. На рис. 5 отображена часть такого эллипса, соответствующего бистатической задержке 0.1 мкс (кривая 1). Точки пересечения этого эллипса с

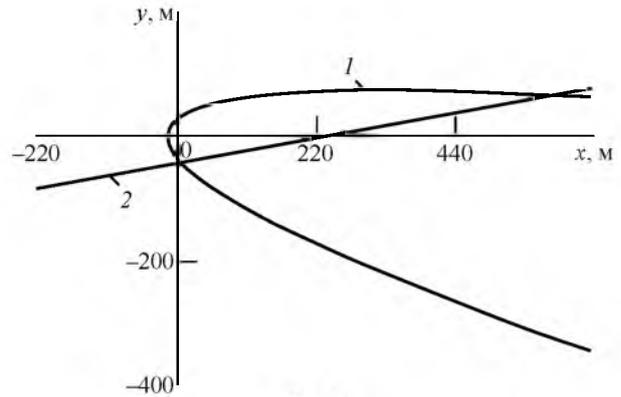


Рис. 5

линией дороги (кривая 2) являются точками возможного положения цели. Начало прямоугольной системы координат помещено в точку положения ПП. Эллипс и линия дороги построены на основе известных географических координат ПП, СИ (телебашня ЛРТГЦ) и интересующего участка КАД.

Линия пересекает эллипс в двух точках, т. е. в общем случае существуют два возможных положения автомобиля. Устранение неопределенности может выполняться различными способами. В рассматриваемом случае данная проблема решалась благодаря особенностям взаимного расположения ПП, СИ и дороги. Несколько упростив, можно предположить, что из двух возможных положений автомобиля на интересующем отрезке КАД одно приходится на участок с отрицательными значениями координаты x (см. рис. 5), второе – с положительными. На рис. 6 и 7 показаны изменения τ_b и f_D для автомобилей, движущихся по дороге на восток (штриховые кривые) и на запад (сплошные кривые) со скоростями 80 и 110 км/ч (кривые 1 и 2 соответственно; стрелки показывают направление изменения параметров). Почти на всем участке с положительными x τ_b (рис. 7, а) и f_D (рис. 7, б) малы и почти не меняются из-за того, что этот участок дороги находится между ПП и СИ близко к линии базы⁴. При обработке

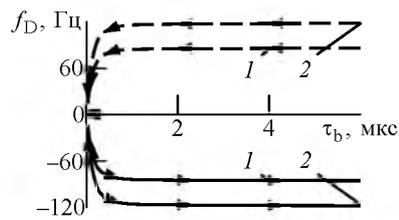


Рис. 6

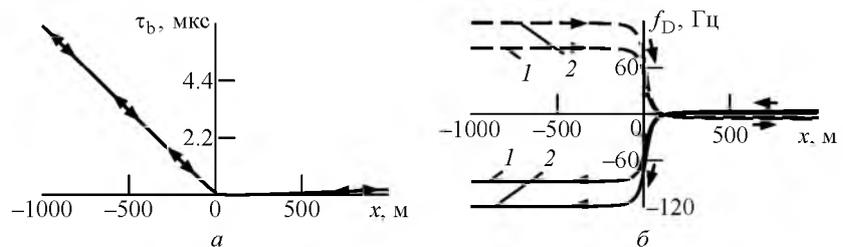


Рис. 7

⁴ Подробно о зависимости бистатических задержки и доплеровского смещения частоты от геометрии ПБР см. гл. 3 в [4].

обнаруживались сигналы от целей с заметно отличающимся от нуля доплеровским смещением частоты (более 5 Гц по модулю) и, значит, практически все обнаружения соответствовали автомобилям с отрицательными значениями x . Отметим также, что для этих автомобилей знак доплеровского смещения однозначно определяет направление движения ("плюс" – на восток, "минус" – на запад), что позволяет вместо одной линии дороги использовать две и тем самым повысить точность определения координат.

Зная координаты автомобиля, можно вычислить бистатистический угол β . Далее с учетом бистатистического угла, направления движения, угла φ между направлением движения и биссектрисой бистатистического угла определяется скорость автомобиля с использованием (2) (углы места $\varepsilon_{\text{Г}}$ и $\varepsilon_{\text{Д}}$ равны нулю).

Траекторная обработка. Применяемые в системах ПБР способы траекторной обработки во многом определяются набором измеряемых величин [3]. При наличии измерений азимута и бистатистических задержки и доплеровского смещения частоты целесообразно координаты объекта преобразовать в прямоугольную систему координат (СК) и осуществить в ней траекторную обработку. В рассматриваемом случае измерения азимута недоступны. Применение описанной ранее процедуры определения координат приводит к тому, что все отметки, включая ложные, оказываются привязанными к одной или к двум прямым, что осложняет отождествление, так как устраняется возможность селекции ложных отметок по пространству. Кроме того, представляется сложным оценить точность определения положения цели после такого преобразования, что препятствует организации стробирования и снижает эффективность фильтрации. Поэтому было принято решение использовать сопровождение в координатах (τ_b, f_D) с последующим преобразованием полученных "траекторий" в прямоугольную СК.

"Траекторию" цели на плоскости τ_b, f_D (см. рис. 6) для данной конфигурации ПБР и дороги можно представить в виде совокупности нескольких участков. Обращает на себя внимание линейный характер зависимостей на большей части "траекторий" за исключением области малых задержек (менее 0.5 мкс), где характер "траекторий" нелинейный. Наличие продолжительных линейных участков означает, что при сопровождении в бистатистических координатах τ_b, f_D можно использовать линейные алгоритмы фильтрации. Отметим также,

что взаимная независимость измерений задержки и доплеровского смещения цели позволяет сопровождать объект по каждой координате отдельно, что снижает нагрузку на вычислительные средства.

Исходными данными для системы траекторной обработки являются результаты одновременных измерений задержки и доплеровского смещения частоты, в совокупности составляющие отметку. Интервал следования отметок выбран равным 0.512 с, далее этот интервал будем называть обзором. В общем случае для организации оптимальной траекторной обработки должны быть известны статистические свойства погрешностей радиолокационных измерений σ_{τ_b} и σ_{f_D} , которые используются для вычисления весов при фильтрации и для выставления стробов на этапе сопровождения. В рассматриваемом случае точные значения погрешностей известны не были и оценивались на основе имеющихся измерений.

Алгоритмы траекторной обработки включают в себя обнаружение траектории, отождествление новых отметок с сопровождаемыми траекториями, фильтрацию параметров траекторий, сброс сопровождения [5]. При обнаружении траекторий использовался критерий "2/2", т. е. траектория считалась обнаруженной, когда от цели приходили отметки на двух обзорах подряд. Пространственная плотность ложных отметок была невысокой, поэтому в качестве метода отождествления использовался простейший алгоритм "ближайшего соседа", согласно которому для продолжения траектории выбиралась отметка, ближайшая к предсказанному положению цели. Экстраполяция и фильтрация производились в предположении линейного характера траектории по каждой координате отдельно при помощи стандартного фильтра Калмана. Сброс сопровождения траектории производился при отсутствии отметок на протяжении трех обзоров подряд.

На рис. 8, а показаны все траектории на плоскости τ_b, f_D , обнаруженные, сопровождаемые и сброшенные за случайно выбранный временной интервал, равный 30 с. Рядом с последней отметкой каждой траектории отображается ее номер.

Результаты траекторной обработки показывают, что цели уверенно обнаруживаются и сопровождаются на линейном участке траектории, тогда как на нелинейном (в области малых задержек) существуют пропуски. Основной причиной этого эффекта является низкая вероятность обнаружения целей на данном участке, свойственная ПБР. С точки зрения траекторной обработки в

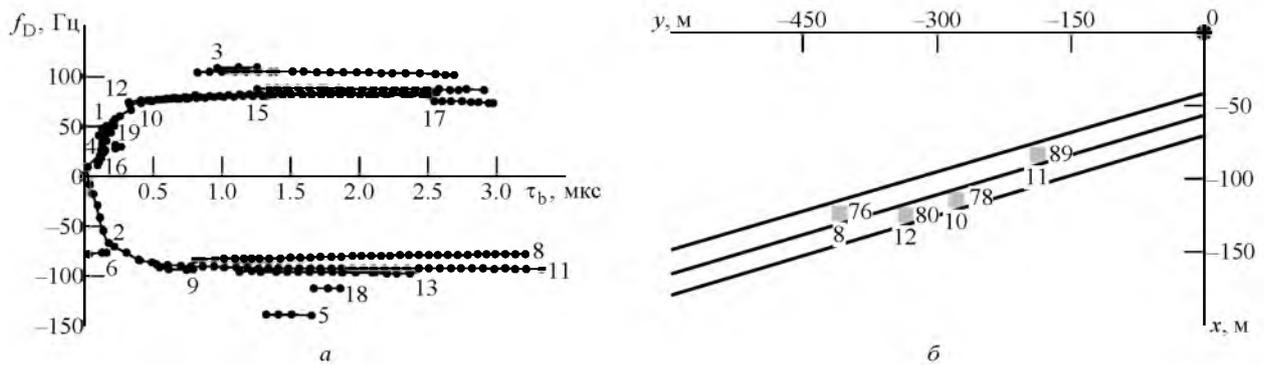


Рис. 8

данной области имеет место нелинейный характер зависимости измеряемых величин от времени, что обуславливает необходимость применения робастных или адаптивных методов фильтрации. К первым относится, например введение искусственно старения данных (экспоненциальное забывание), когда при формировании текущей оценки новым измерениям придается больший вес, чем старым; ко вторым – переключаемый алгоритм, который использует фильтр Калмана на линейном участке траектории и нелинейный фильтр (например, ансцентный фильтр Калмана) на нелинейном.

Для траекторий, длящихся более 5 с, выполнялось определение координат и скорости, как описано ранее. Один из кадров индикатора положения и скорости автомобилей приведен на рис. 8, б. Справа от квадратных маркеров, показывающих положение автомобиля в прямоугольной СК с началом в точке расположения ПП, отображается измеренная скорость в километрах в час, снизу – номер траектории.

Максимальная дальность обнаружения автомобилей составила 528 м.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности применения ПБР в качестве так называемого полицейского радара, предназначенного для измерения скорости объектов. Очевидно, что такое устройство не должно быть громоздким и, следовательно, не может иметь большую антенну, чтобы измерять направление на автомобиль. Для того чтобы ПБР выполнял функции полицейского радара, должны быть известны данные о взаимном расположении дороги и стороннего источника излучения, что может рассматриваться как недостаток по сравнению с

теми полицейскими радаром, которые нужно лишь наводить на автомобиль. В то же время, ПБР обещает получение несомненных преимуществ. Для ПБР принципиально невозможно сделать антирадар, так как ПБР не излучает, а использует имеющиеся практически везде электромагнитные волны. ПБР необязательно размещать над дорогой или с ее краю, как это делается для совмещения луча радара и вектора движения автомобиля, чтобы точно измерить его скорость. Более того, дорога необязательно должна быть прямолинейной. В ПБР выполняется траекторное сопровождение, а значит, координаты и скорость могут измеряться даже при повороте автомобиля, что, впрочем, должно быть учтено в траекторной обработке. ПБР одновременно сопровождает все автомобили, находящиеся в зоне его действия. Дальность действия ПБР может оказаться заметно больше дальности действия существующих полицейских радаров. В рассмотренном случае отраженные от автомобилей волны поступали в приемник по боковым и задним лепесткам диаграммы направленности антенны. С учетом, что коэффициент усиления антенны Alcad NEO-085 для 35-го телевизионного канала равен 15 дБ, а уровень лепестков, как отмечено ранее, от -25 до -35 дБ, ослабление составило от 10 до 20 дБ. Антенна размещалась на земле. При этом дальность действия (528 м) оказалась соизмерима с дальностью действия существующих полицейских радаров. Если отраженные сигналы будут приниматься без ослабления даже на ненаправленную, но поднятую над землей антенну, дальность действия будет больше как минимум в три раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиолокация по сигналам сторонних источников. Ч. 1: Современное состояние / А. А. Коновалов, А. В. Бархатов, В. И. Веремьев и др. // Инновации. 2013. № 9. С. 8–13.

2. Bistatic radar: emerging technology / ed. by M. Cherniakov. Chichester: John Wiley, 2008. 406 p.

3. Kirubarajan T., McDonald M. Multitarget Passive coherent location with transmitter-origin and target-altitude

uncertainties / R. Tharmarasa, M. Subramaniam, N. Nadarajah et al. // IEEE Trans. on AES. 2012. № 3. P. 2530–2550.

4. Willis N. J. Bistatic radar. Raleigh, NC: SciTech publishing Inc. 2005. 329 p.

A. V. Barkhatov, A. A. Konovalov

Saint-Petersburg state electrotechnical university "LETI"

5. Радиотехнические системы: учебник для студ. высш. учеб. заведений / под ред. Ю. М. Казаринова. М.: Academia, 2008. 590 с.

Application of digital terrestrial television signals for vehicle position and speed determination

The vehicle position and speed determination by passive bistatic radar that exploits illumination of digital terrestrial TV-station DVB-T2 standard with estimation of bistatic delay and Doppler frequency shift and without estimation of direction of signal arrival is considered. Track processing of bistatic measurements is discussed. Results of vehicle tracking on Saint Petersburg Ring road are presented.

Radiolocation, passive, bistatic, semi-active, police, radar

Статья поступила в редакцию 29 января 2014 г.

УДК 621.396.62

А. С. Подстригаев, А. И. Беззуб
Брянский государственный технический университет

Широкополосное приемное устройство станции радиоэлектронной борьбы

Рассмотрены приемные устройства станций радиоэлектронной борьбы. На основе известных технических решений предложен подход к построению приемного устройства с улучшенными технико-экономическими показателями. Приведены критерии реализуемости приемного устройства, построенного по указанной схеме, а также выражения, описывающие частотный план высокочастотной части приемного устройства. Решена задача исключения неоднозначности определения частоты при попадании сильных сигналов в смежные области соседних каналов.

Радиотехника, военная техника, радиоэлектронная борьба, станция радиоэлектронной борьбы, приемное устройство

В настоящее время широкий диапазон возможных рабочих частот радиолокационных станций (РЛС) диктует необходимость использования станций радиотехнической разведки и радиоэлектронных помех (далее – станций радиоэлектронной борьбы (РЭБ)) с широкой мгновенной полосой обзора. Под широкой полосой в настоящей статье понимается диапазон шириной до десятков гигагерц. Многие основные тактико-технические характеристики РЭБ определяются ее приемной системой. Исходя из решаемых тактических задач, приемная система может включать в себя один или несколько каналов, каждый из которых содержит приемное устройство. Поэтому целесообразно рассмотреть варианты реализации широкополосного приемного устройства (ШПУ) станции РЭБ, а также технологии, актуальные для его построения, и на основе анализа этих вариантов и технологий попытаться сформулировать общий подход к про-

ектированию и сформировать обобщенную структурную схему, отвечающие современному уровню развития техники РЭБ и радиолокационной техники.

Обзор основных схем и технологий. В настоящем разделе приведены краткий обзор и анализ структурных схем широкополосных приемников РЭБ и описание применяемых при их реализации технологий.

Сканирующий приемник (рис. 1) выполняет поиск сигнала и определение его частоты перестройкой частоты гетеродина и детектирования принятого сигнала на промежуточной частоте (ПЧ) [1]. Совместно с гетеродином могут перестраиваться и частотно-зависимые цепи (фильтры и усилители высокой частоты (ВЧ)) [2]. При использовании сканирующего приемника возможен пропуск цели, так как одновременно анализируется не весь диапазон частот. Вероятность пропуска (зависящая от параметров сигнала) умень-