

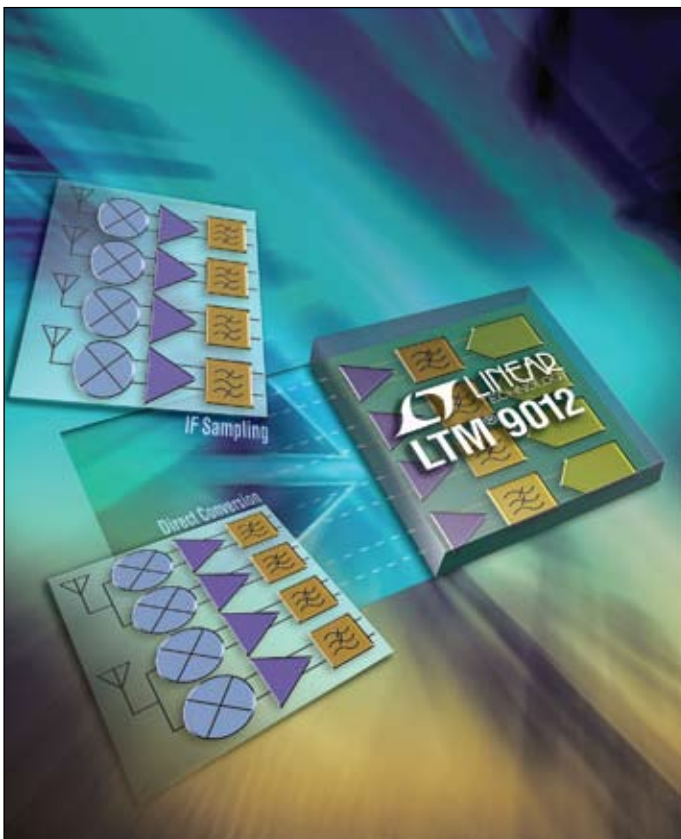
Сравнение аппаратных архитектур приемников на основе новых компонентов

Спор о том, какая структура приемников лучше — супергетеродинная или прямого преобразования (она же гомодинная, или супергетеродинная с нулевой промежуточной частотой), восходит к 1930-м годам. И та, и другая имеют свои преимущества при использовании в определенных типах оборудования.

Тод НЕЛЬСОН (Todd NELSON)

Введение

Супергетеродинная схема распространена в базовых станциях сотовой связи, а прямое преобразование завоевало популярность в программно-конфигурируемой радиоаппаратуре, например в муниципальных радиостанциях. Простота аппаратной части схемы прямого преобразования теоретически должна приводить к экономии средств, электроэнергии и места на плате по сравнению с супергетеродинной схемой, что представляет интерес для операторов сотовой связи. Но расплачиваться за эту простоту приходится сложностью программного решения характерных проблем, связанных с постоянным смещением. В этой статье мы рассмотрим кажущиеся и действительные различия между двумя упомянутыми аппаратными структурами, пойдя легким путем и оставив без внимания вопросы программного обеспечения.



Громадные объемы данных, передаваемые сегодня по сотовым сетям, — результат стремительного технического совершенствования смартфонов, планшетных ПК и других устройств с доступом к Интернету в этих частотных диапазонах. Технические требования возросли, а перед поставщиками оборудования встала задача снижения себестоимости. Существует множество видов современных базовых станций, начиная от традиционных стоек до небольших модулей, потребляющих считанные ватты. Схемные решения, необходимые для реализации миниатюрной базовой станции с множеством каналов, предполагают разнообразные подходы к интеграции. Возникает вопрос: насколько существенны аппаратные различия супергетеродинной схемы и схемы прямого преобразования с учетом последних достижений техники?

Две структуры построения приемников

По преобладающему мнению, супергетеродинную схему приемника изобрел Эдвин Армстронг (Edwin Armstrong) в 1918 г. В этом распространенном типе приемника радиосигнал смешивается с сигналом гетеродина, в результате чего возникает сигнал промежуточной частоты (ПЧ), который затем демодулируется. Частота гетеродина смещена относительно несущей частоты радиосигнала, поэтому образуются так называемые зеркальные каналы. Сигнал ПЧ пропуска-

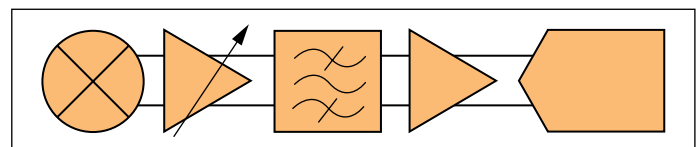


Рис. 1. Схема супергетеродинного приемника

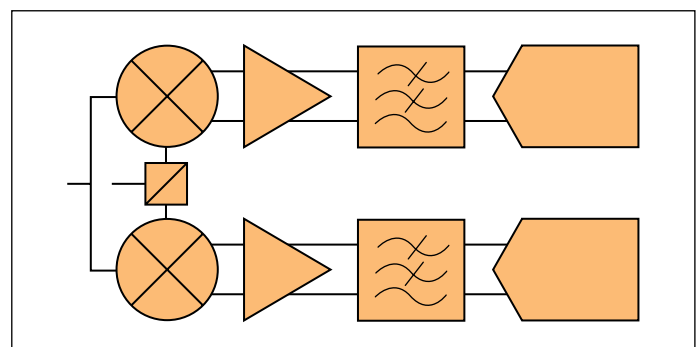


Рис. 2. Схема приемника прямого преобразования

ется, а сигналы зеркальных каналов отфильтровываются. В современных приемниках сигнал ПЧ преобразуется в цифровую форму с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и в этой же форме демодулируется (рис. 1).

Приемник прямого преобразования был разработан несколькими годами позже как альтернатива супергетеродинному приемнику. В нем, в отличие от супергетеродинной схемы, частота гетеродина равняется несущей частоте радиосигнала. Вместо одного смесителя имеется два: на одном радиосигнал смешивается с синфазным сигналом гетеродина, а на другой — с квадратурным сигналом гетеродина. Результатом является демодулированный низкочастотный выходной сигнал, который оцифровывается двумя АЦП (рис. 2). Иными словами, промежуточная частота равняется нулю. Требования к фильтрации упрощаются, так как необходим только фильтр нижних частот (ФНЧ), в отличие от супергетеродинов, где нужен еще полосовой фильтр.

Развитие аппаратной части

Прошедшие десятилетия были отмечены устойчивым прогрессом: характеристики всех интегральных компонентов (ИС) непрерывно улучшаются с одновременным снижением энергопотребления и уменьшением размеров. Рост разрешения и частоты дискретизации АЦП дал возможность работать с более широкополосными сигналами и более высокими входными частотами.

На ранних этапах привлекательной чертой приемника с прямым преобразованием было однократное частотное преобразование. В прошлом в супергетеродинных приемниках применялось несколько каскадов понижения частоты. Постепенно по мере технического совершенствования смесителей и фильтров число каскадов сокращалось, и в конечном итоге в типичном супергетеродинном приемнике остались всего один аналоговый частотно-преобразовательный каскад и один цифровой каскад понижения частоты, реализованный в цифровом сигнальном процессоре.

Еще одно преимущество схемы с прямым преобразованием — фильтрация только нижних частот. В супергетеродине необходим еще полосовой фильтр на промежуточной частоте. Во многих случаях полосовой фильтр имеет высокий порядок или принадлежит к типу фильтров на поверхностных акустических волнах (ПАВ). ПАВ-фильтрам требуется герметичный корпус, и зачастую они довольно громоздки и дороги. Хотя технологии ПАВ-фильтров и корпусов претерпели изменения к лучшему, ФНЧ до сих пор считается более привлекательным вариантом.

Сравнение новейших компонентов

Чтобы попытаться корректно сравнить себестоимость, энергопотребление и занимаемую на плате площадь, необходимо выбрать компоненты для реализации четырехканального приемника небольшой базовой станции, рассчитанной на полосу пропускания сигнала 20 МГц. В каждом канале супергетеродинного приемника используются одиночный смеситель, усилитель с регулируемым коэффициентом усиления, ПАВ-фильтр, второй каскад УПЧ и быстродействующий АЦП. В каждом канале приемника прямого усиления — синфазно-квадратурный демодулятор, два УНЧ и два быстродействующих АЦП. Для сравнения площади на плате, занимаемой этими компонентами, используется примерная компоновка печатной платы, а номинальное энергопотребление рассчитывается по паспортным характеристикам. Ожидается, что схема с прямым преобразованием окажется существенно лучше в обоих отношениях.

Пример супергетеродинного приемника

Для четырехканального супергетеродинного приемника можно взять серийно выпускаемые двухканальные смесители в корпусах QFN размерами 5×5 мм; в общей сложности потребуется два двухканальных смесителя. Благодаря наличию встроенных симметри-

рующих трансформаторов и внутренних согласующих компонентов на входах радиосигнала и гетеродина число пассивных компонентов оказывается минимальным, а их типоразмеры — в основном 0201 и 0402; этими компонентами мы пренебрегаем в данном сравнении, поскольку они требуются и в случае прямого преобразования. В продаже имеются также двухканальные цифровые усилители с регулируемым коэффициентом усиления на соответствующие диапазоны частот. Эти усилители также выпускаются в корпусах QFN размерами 5×5 мм, и, опять-таки, для реализации четырех каналов необходимо две такие ИС.

После смесительных каскадов потребуются, возможно, некоторая фильтрация, поэтому следует взять несколько дросселей 0402 и конденсаторов 0201. Для получения требуемой избирательности в супергетеродинном приемнике нужны полосовые ПАВ-фильтры — по одному на каждый из четырех каналов. На радиочастотах ПАВ-фильтры могут быть компактными. В распространенном диапазоне ПЧ от 70 до 192 МГц можно найти ПАВ-фильтры в корпусах размерами 5×7 мм.

В дополнение к ПАВ-фильтру потребуется несколько согласующих компонентов, даже если выходное сопротивление регулируемого усилителя и входное сопротивление последующего усилителя равняется 50 Ом. Обычно для компенсации вносимых потерь фильтра нужен еще один усилительный каскад. Однако в ассортименте компании Linear Technology имеется новый четырехканальный АЦП со встроенными усилителями серии μ Module, изготовленный по технологии «система в корпусе» (System in Package, SiP) LTM9012-AB. Имея размеры 15×11,25 мм, он занимает меньше места, чем эквивалентный четырехканальный АЦП с четырьмя дифференциальными усилителями плюс сопутствующие блокировочные конденсаторы и компоненты фильтров побочных частот. При коэффициенте усиления 20 дБ микросхема LTM9012 позволяет получить отношение сигнал/шум 68,5 дБ и динамический диапазон без паразитных составляющих (SFDR) 79 дБ. Усилители и фильтры LTM9012-AB ограничивают частоту входного сигнала значением около 90 МГц. Поэтому нам подходит промежуточная частота 70 МГц, но не более высокие значения ПЧ, часто применяемые в супергетеродинных приемниках базовых станций. Тем не менее это дает самую компактную реализацию.

Микросхема LTM9012 отражает альтернативный подход к интеграции. Технология корпусирования μ Module, или SiP, позволяет смонтировать несколько отдельных кристаллов вместе с различными пассивными компонентами на ламинированной подложке и герметизировать всю систему так, чтобы она выглядела как обыкновенная ИС в корпусе BGA. В данном случае АЦП оптимизирован для низкого энергопотребления и высоких характеристик на переменном токе с использованием «тонкой» КМОП-технологии. Усилители выполнены по кремний-германиевой (SiGe) технологии для получения наилучших их характеристик. Это традиционные дифференциальные усилители, поэтому коэффициент усиления устанавливается при помощи резисторов равным 10 В/В, или 20 дБ.

Вход на реальном ОУ упрощает согласование, изолируя сигнальный тракт от высокочастотных импульсных помех дискретизации, а также обеспечивает возможность внутреннего сопряжения несимметричных сигналов с дифференциальными входами АЦП. Большинство монолитных АЦП с буферизованным входом вовсе не имеют усиления, являются при этом дифференциальными и обеспечивают только изоляцию от помех. Также полезна и фильтрация побочных частот, ограничивающая широкополосный шум усилителя. Благодаря тому что все опорные и блокировочные конденсаторы располагаются в корпусе ИС, систему в целом можно очень компактно расположить на плате, не жертвуя характеристиками. Необходимость в компромиссах подобного рода часто возникает, когда опорные и блокировочные конденсаторы находятся на слишком большом или слишком малом расстоянии от цифровых сигнальных линий, что может привести к ошибкам в процессе преобразования данных. И кроме того, выводы на подложке расположены логично: аналоговый с одной стороны, цифровые с другой.

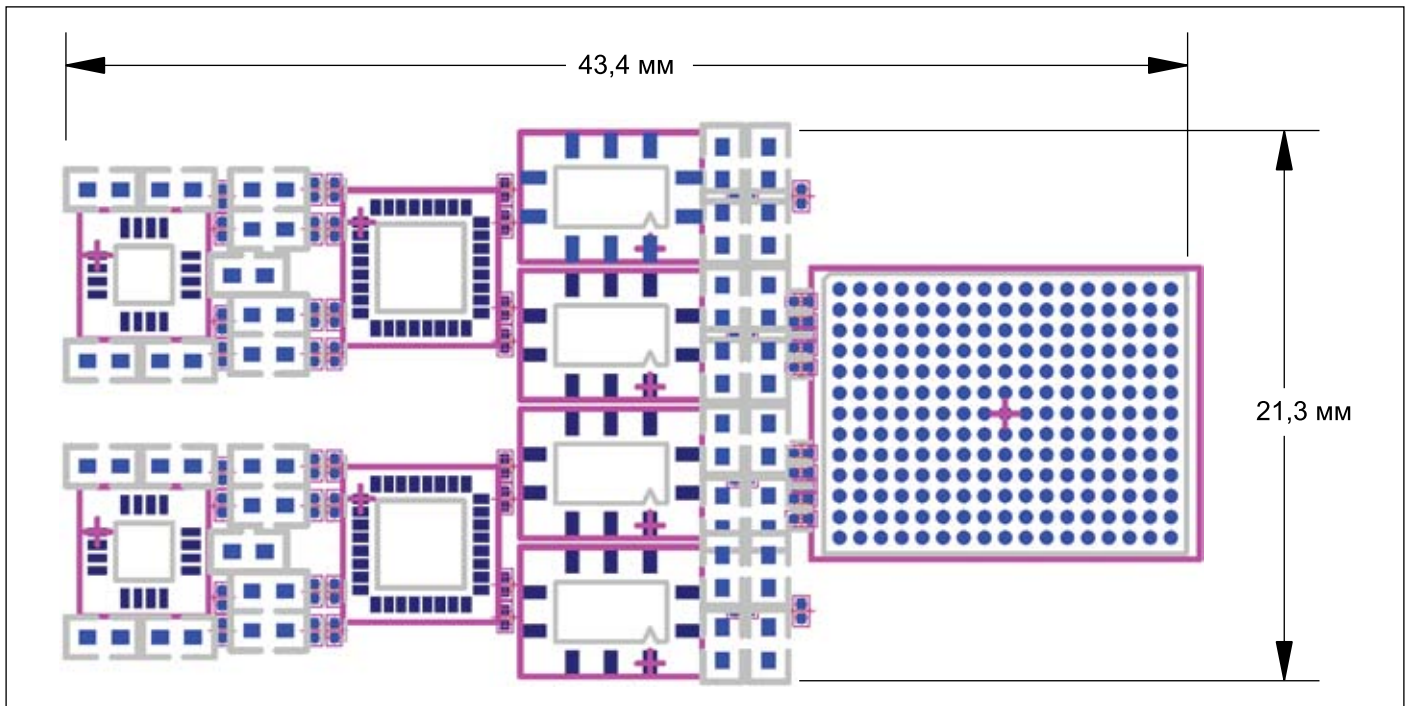


Рис. 3. Пример компоновки печатной платы супергетеродинного приемника

В этом примере имеется пять активных компонентов, четыре ПАВ-фильтра и 80 других мелких пассивных компонентов (рис. 3). Общая площадь составляет примерно $43 \times 21 = 903 \text{ мм}^2$, но это пространство задействуется не полностью, поэтому эффективная площадь равна примерно 700 мм^2 . Конечно, здесь предполагается монтаж на одной стороне платы, и возможно еще более компактное расположение. Для расчета потребляемой мощности в данном примере используются LT5569 в качестве двухканального смесителя, AD8376 в роли двухканального усилителя с регулируемым коэффициентом усиления и LTM9012-AB в качестве второго усилительного каскада каждого канала и четырехканального АЦП.

Смеситель относится к активному типу и работает в широком диапазоне частот (от 300 МГц до 4 ГГц), поэтому один компонент можно приспособить для работы в любом диапазоне сотовой связи от 700 МГц до 2,7 ГГц. При самом низком в своем классе энергопотреблении он также имеет устойчивые входы, способные выдержать сильные внутрислосные блокирующие помехи без существенного ухудшения коэффициента шума. Общая потребляемая мощность четырехканальной системы равна 4,9 Вт без учета возможного рассеяния мощности в резистивных делителях.

Пример приемника с прямым преобразованием

Для реализации четырехканального приемника с прямым преобразованием единственный вариант — это отдельные синфазно-

квадратурные демодуляторы, поэтому потребуется четыре таких компонента в корпусах QFN размерами $5 \times 5 \text{ мм}$. Некоторые из них, например LT5575, имеют встроенные симметрирующие трансформаторы на входах радиосигнала и гетеродина для минимизации числа внешних компонентов. Понадобится некоторая фильтрация и, разу-

меется, несколько малогабаритных блокировочных конденсаторов. Для фильтра нижних частот выполняется несколько LC- и RC-цепочек. В качестве усилительного каскада можно снова взять ИС LTM9012-AB. Будучи четырехканальной, она обеспечивает только два канала прямого преобразования, поэтому потребуется вторая такая микросхема.

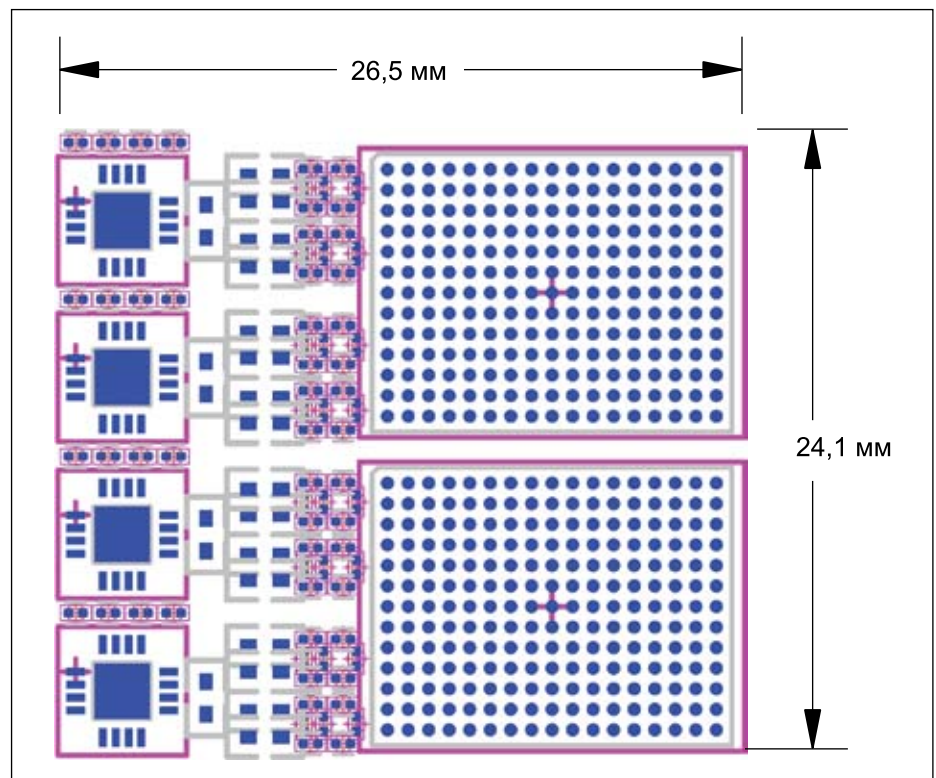


Рис. 4. Пример компоновки печатной платы приемника прямого преобразования

В данном примере имеется шесть активных компонентов и 84 малогабаритных пассивных компонента (рис. 4). Общая площадь примерно равна $27 \times 24 \text{ мм} = 648 \text{ мм}^2$. Для расчета потребляемой мощности здесь используется синфазно-квадратурный демодулятор LT5575 и два АЦП LTM9012-AB. Общая потребляемая мощность четырехканальной системы равна 5,1 Вт без учета возможного рассеяния мощности в резистивных делителях. При этом частота дискретизации АЦП равна 125 МГц, что является распространенным вариантом, но, вероятно, больше, чем необходимо для сигнала 10 МГц. На частоте дискретизации 65 МГц те же функции можно было бы выполнять при гораздо меньшем энергопотреблении со стороны АЦП. Если пересчитать потребляемую мощность для этой частоты, результат будет равен 4,6 Вт.

Ожидания и реальность

Не так уж много лет назад в супергетеродинном приемнике использовалось несколько смесителей и несколько ПАВ-фильтров на канал, причем размеры ПАВ-фильтров того времени могли достигать $25 \times 9 \text{ мм}$. Пассивные смесители требовали дополнительных усилительных каскадов для компенсации вносимых потерь. Эти воспоминания из недавней истории искажают восприятие сравнительной аппаратной сложности супергетеродинных приемников и приемников прямого преобразования. Супергетеродинный приемник занимает на 39% больше места на плате, чем приемник прямого усиления; в процентах это немало, но на реальных печатных платах разница оказывается не столь велика. 39% от 903 мм^2 — это 352 мм^2 , что примерно равняется площади отпечатка большого пальца. Относительная разница в энергопотреблении вообще незначительна.

Представление о значительно больших размерах и энергопотреблении супергетеродинного приемника зависит, конечно, от общих габаритов приемника базовой станции. В форм-факторе традиционной монтажной стойки участок на печатной плате размером с большой палец может не играть роли, а для крошечной базовой станции, которая умещается на ладони, тот же участок будет весьма существенным.

Реальность заключается в том, что степень интеграции растет — иногда медленно, а иногда огромными скачками. Может случиться, что в одной из архитектур сокращение занимаемой площади или уменьшение энергопотребления будет значительнее, чем в другой. Недавний тому пример, относящийся к супергетеродинному приемнику, — двухканальный активный смеситель LT5569. Двухканальные синфазно-квадратурные демодуляторы для базовых станций сотовой связи автору неизвестны, хотя такие устройства и существуют для других применений в более низких диапазонах частот.

Примером интеграции, распространяющейся на обе структуры, может служить четырехканальный АЦП со встроенными усилителями LTM9012. Последовательный интерфейс LVDS этого устройства позволяет не только миниатюризировать АЦП, но и, возможно, создать программируемую пользователем вентиляционную матрицу (FPGA) или цифровой сигнальный процессор, которые по своим размерам будут меньше четырех АЦП с параллельными интерфейсами. Вместе с тем схема с прямым преобразованием требует вдвое большего количества АЦП.

Рассмотренный выше пример приведен, если мы предполагаем, что требования к характеристикам базовой станции сотовой связи обязывают применять высококачественные компоненты во всей сигнальной цепочке. При изготовлении продуктов, заданных в этом примере, используются оптимизированные технологические процессы, такие как кремний-германиевая (SiGe) и КМОП-технологии, которые в общем случае не благоприятствуют взаимной интеграции — по крайней мере, без ухудшения характеристик. Требования к характеристикам базовых станций определенного размера могут допускать применение однокристалльных передатчиков высокой степени интеграции, например фемтоячеек. Усовершенствования в интегрированных блоках таких ИС позволят использовать их в более крупных базовых станциях. И на этом этапе рассмотрения двух структур мы столкнемся с проблемами, связанными с сигнальным фильтром.

ФНЧ приемника прямого преобразования можно реализовать в полупроводнике, но сделать то же самое с полосовым фильтром, который используется в супергетеродинном приемнике, оказалось чрезвычайно трудной задачей. Это реальность дня, а не обязательно какой-то принципиально неустранимый барьер. Может быть, когда-нибудь произойдет технический прорыв, который сделает возможной реализацию высокоизбирательных полосовых фильтров на кристалле. А пока схема с прямым преобразованием будет иметь преимущество в части потенциальной интеграции всей приемной цепи там, где это допускается техническими характеристиками.

Заключение

Приемник прямого преобразования для базовых станций имеет более простую структуру, чем супергетеродинный приемник, по крайней мере с точки зрения аппаратной части. Вместе с тем новые серийные компоненты позволяют создавать гораздо более компактные, чем прежде, многоканальные супергетеродинные приемники. И хотя их размер по-прежнему больше в процентном отношении, на практике разница может оказаться незначительной. Поэтому ожидается, что супергетеродинная архитектура останется предпочтительной для приемников базовых станций сотовой связи. ■