

Чипсет компании Infineon для радарных приложений на 24–26 ГГц

В 2012 году компания Infineon выпустила на рынок BGT24Mxx — семейство высокоинтегрированных радарных трансиверов для диапазона 24–26 ГГц. Первоначально анонсированные как «автомобильные», эти чипы выпускаются в корпусах VQFN-32, имеют рабочий температурный диапазон $-40...+105\text{ }^{\circ}\text{C}$ и напряжение питания 3,3 В. Их появление стало возможным благодаря технологии b7hf200, которая обеспечивает граничную частоту усиления 200 ГГц.

Микросхемы сертифицированы по стандарту AEC Q100 и имеют встроенную защиту от статического электричества (ESD protection), как, впрочем, и многие другие продукты Infineon — это своего рода «конек» компании. В статье пойдет речь об этом семействе и возможностях его применения, которое расширено благодаря их невысокой стоимости: 10–20 евро при заказе от 1000 шт.

Константин ГОРБАТОВ
kvg@efo.ru

Семейство микросхем BGT24MTRxx и их устройство

Семейство микросхем BGT24MTRxx включает в себя:

- BGT24MR2 — SiGe 24-ГГц моноканальный IQ-приемник, предназначенный для работы в диапазоне частот 24–24,5 ГГц. Его структурная схема показана на рис. 1.
- BGT24MTR11 — SiGe 24-ГГц моноканальный приемопередатчик, предназначен для работы в диапазоне частот 24–24,5 либо 24–26 ГГц. Его структурная схема показана на рис. 2.
- BGT24MTR12 — SiGe 24-ГГц моноканальный приемопередатчик, предназначенный для работы в диапазоне частот 24–24,5 ГГц; он имеет дополнительный IQ-приемник по сравнению с MTR11. Его структурная схема показана на рис. 3.

Первый, самый «младший» чип семейства, BGT24MR2, не имеет передающей части. Его можно использовать в качестве приемника совместно с внешним генератором либо вместе со «старшими» чипами, для увеличения числа независимых приемных каналов. Генератор

частоты на 24 ГГц может быть реализован, например, на диэлектрическом резонаторе и микросхеме EMM5206LP фирмы Sumitomo [8], что позволяет получить на этой частоте фазовые шумы -100 дБн на отстройке 100 кГц. Заметим, что параметры встроенного генератора несколько хуже: $-85...-75\text{ дБн}$ на отстройке 100 кГц. Пример многоканального решения — один передатчик и несколько разнесенных в пространстве приемников (рис. 4). Это позволяет повышать точность измеряемого расстояния и/или скорости, но самое главное — измерить угол до объекта, что невозможно при одной приемной антенне.

Второй чип, BGT24MTR11, обладает самой полной функциональностью из семейства. Поэтому замечания по применению AN305 и AN341 выпущены производителем именно для него и действительны для остальных микросхем. Рассмотрим его составные части подробнее.

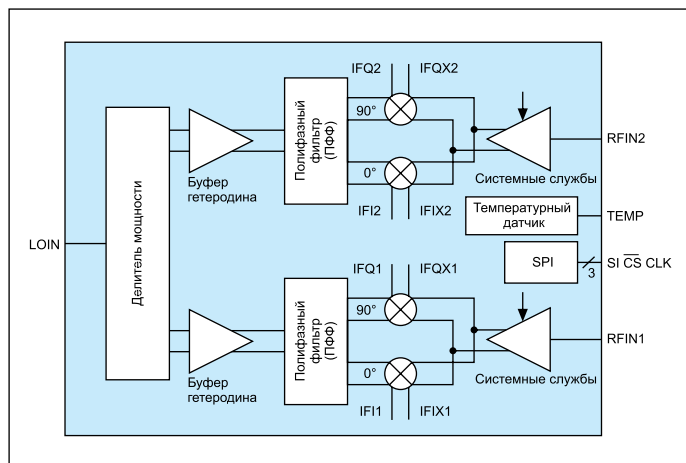


Рис. 1. Блок-схема BGT24MR2

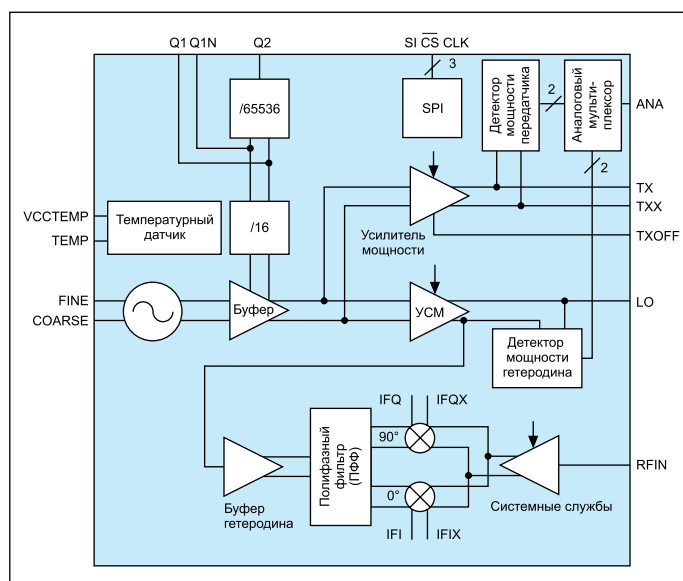


Рис. 2. Блок-схема BGT24MTR11

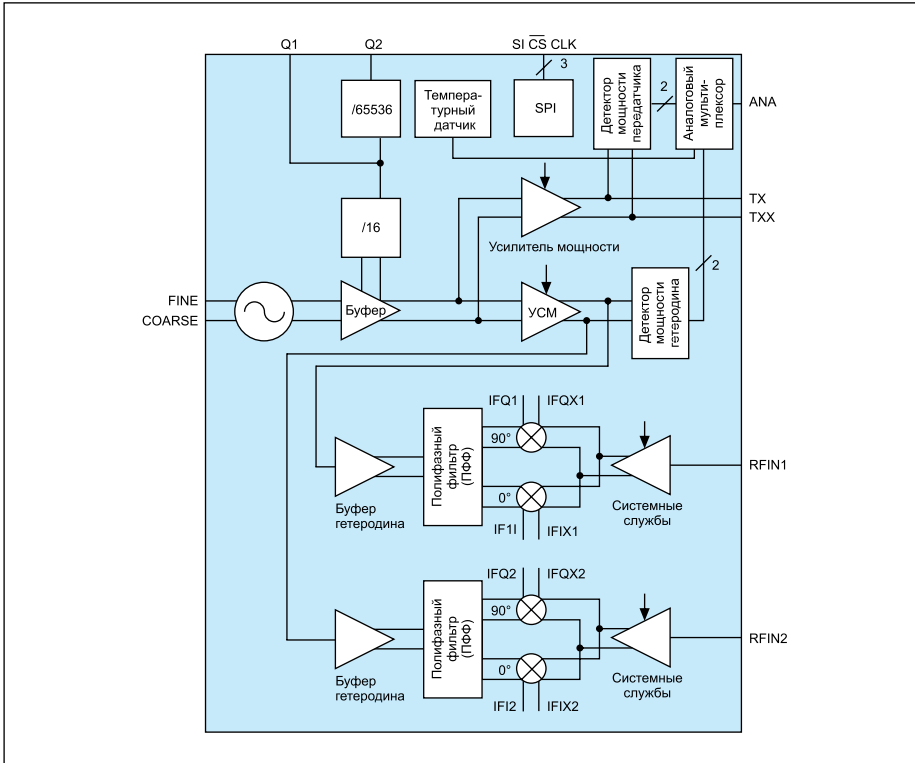


Рис. 3. Блок-схема BGT24MTR12

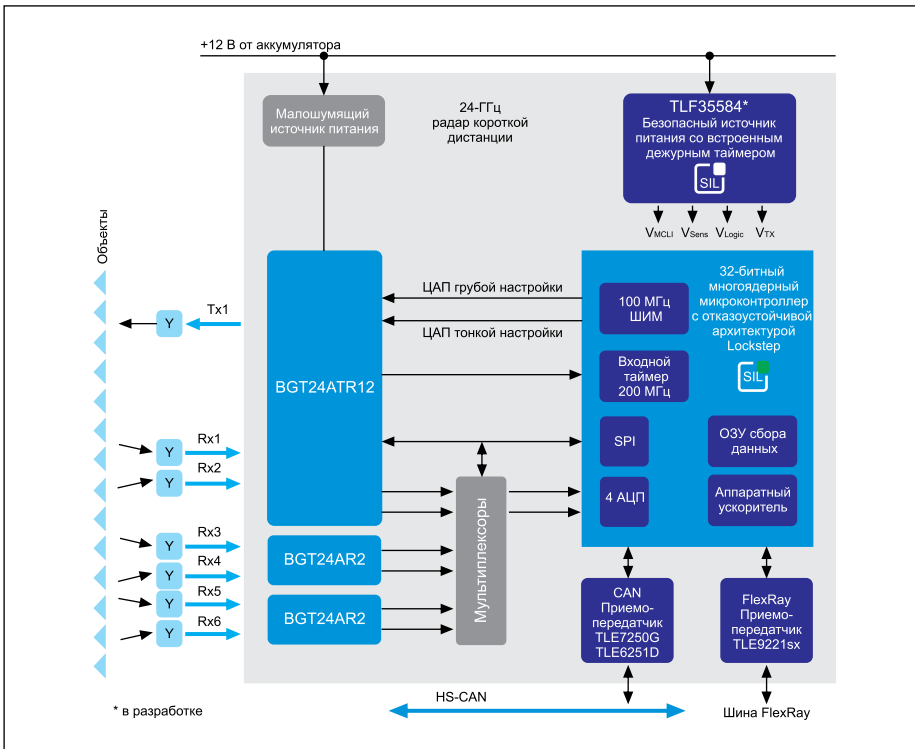


Рис. 4. Блок-схема радарной системы с разнесенными антеннами и вспомогательными микросхемами BGT24MR2

«Сердцем» системы является ГУН (генератор, управляемый напряжением), нагруженный на буферный каскад. Он имеет два входа управления: для тонкой (вывод 4) и грубой (вывод 5) подстройки. Они могут использоваться для управления генерируемой частотой как раздельно, так и со-

вместно. Оба вывода имеют встроенные резисторы подтяжки к напряжению питания V_{CC} . Таким образом, если их никуда не подключать, частота генерации будет в районе 26 ГГц. Зависимость частоты от управляющего напряжения для разных температур показана на рис. 5.

Таким образом, при управляющем напряжении от 1 до 4,8 В обеспечивается перестройка генератора 24–26 ГГц для температурного диапазона от -40 до $+125$ °С, при соединенных выводах 4 и 5. Важно отметить, что управляющее напряжение не должно опускаться ниже 0,5 В, иначе может произойти срыв генерации. Как видно на рис. 2, буфер генератора нагружен на делитель на 16, мощный усилитель (УМ) и усилитель средней мощности (УСМ).

Выход делителя на 16 при частоте 24–26 ГГц будет соответственно 1500–1625 МГц. Он пригоден для использования с большинством современных микросхем ФАПЧ (фазовой автоподстройки частоты). Оба выхода необходимо нагрузить на 50 Ом через емкости развязки. Для снижения потребления делитель на 16 может быть выключен с помощью установки бита 5 SPI в единицу (DIS_DIV16=1).

Второй делитель на 65 536 (2^{16}) делит частоту, поступающую с выхода первого делителя, до 22,8882–24,796 кГц, которая уже может быть измерена с помощью таймеров микроконтроллера или счетчиков DSP и использована для подстройки уходов частоты с помощью ЦАП (цифро-аналогового преобразователя) либо ШИМ (PWM). Пример подобного использования совместно с микроконтроллером Infineon XMC4500 приведен на рис. 6.

При условии, что микроконтроллер имеет тактовую частоту порядка 120 МГц, которая используется для заполнения счетчика, и частота ГУН плывет относительно медленно, мы получим точность поддержания частоты порядка 1/4000. Второй делитель может работать лишь в том случае, когда работает первый делитель (DIS_DIV16=0). Для снижения потребления делитель на 65 536 может быть также выключен с помощью установки бита 6 SPI в единицу (DIS_DIV64k=1).

Усилитель мощности выдает парафазный СВЧ-сигнал на выводы 22, 23 с импедансами 19,8-j20,9 и 18-j17,3 Ом и предназначен для подключения через цепи согласования к передающей антенне с дифференциальным сопротивлением 100 Ом. В случае использования антенны с одиночным входом рекомендуется использовать симметрирующий трансформатор. Биты 0, 1, 2 регистра SPI позволяют уменьшать выходную мощность. Когда все биты равны 1, мощность уменьшается на 9 дБ. Подробные данные о соответствиях управляющих комбинаций ослаблению приведены в таблице 1.

Добавочный бит 3 SPI регистра предназначен для повышения выходной мощности (PC1_BUF=1). Выходная мощность в зависимости от частоты, когда этот бит включен, при разных температурах показана на рис. 7. Его влияние существенно при высокой температуре, а при комнатной температуре включение бита повышает мощность всего на 0,2 дБ.

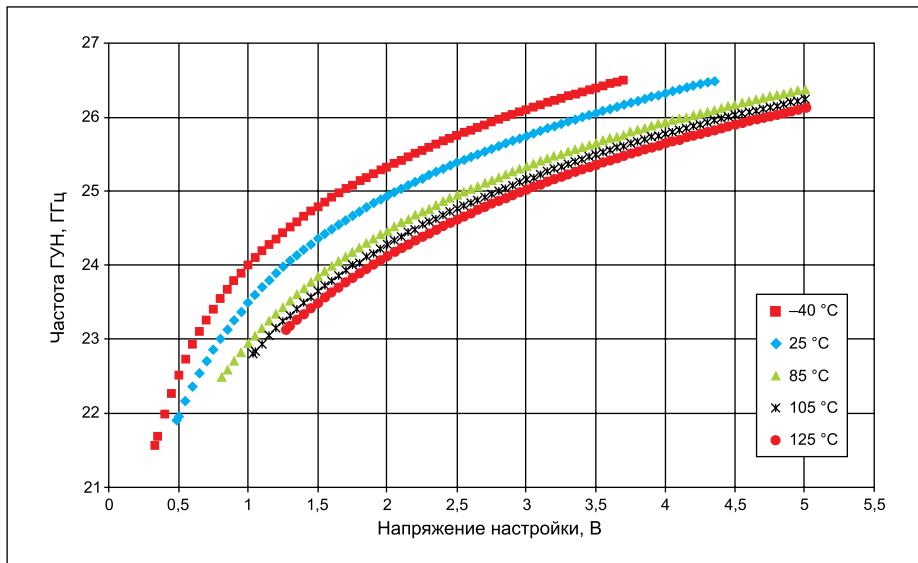


Рис. 5. Зависимость частоты ГУН от напряжения настройки при разных температурах (входы тонкой и грубой настройки соединены вместе)

При включении чипа выходная мощность терминируется на внутреннюю нагрузку, а не выдается наружу. Это сделано для того, чтобы частота сначала стабилизировалась, а уже потом излучалась в эфир, так как в момент включения микросхема нагревается, что ведет к значительному дрейфу частоты.

Для выдачи мощности в антенну есть два способа:

- через регистр SPI: бит 12 устанавливается в 0 (DIS_PA=0);
- с использованием вывода 26 (TXOFF).

При втором способе необходимо сначала установить 12-й бит регистра SPI в 0, активируя выход; затем напряжение на выводе 26 более 1,5 В будет деактивировать выходную мощность, а менее 0,5 В — активировать. Время переключения составляет порядка 500 нс. Соответственно в первом способе предполагается, что напряжение на выводе 26 — менее 0,5 В.

Усилитель средней мощности выдает сигнал на выход 28 (LO) микросхемы. Он имеет импеданс $24,4-j25,8$ и может быть использован для подключения 50-Ом антенны либо служить гетеродином для дополнительных приемников BGT24TR2. Если этот выход не нужен, его можно куда-то не подключать. Мощность на этом выходе отключить нель-

зя, но ее можно регулировать, используя SPI бит 4. Когда этот бит установлен в ноль (PC2_BUF=0), типовая выходная мощность составляет $-3,5$ дБм и 0 дБм, когда этот бит установлен в единицу.

Маломощный усилитель имеет входное сопротивление $22,9-j14,9$ Ом, что позволяет легко согласовать его с 50-Ом трактом. Его усиление можно уменьшить на 6 дБ, установив SPI бит 15 в единицу (GS=1).

Встроенный смеситель обеспечивает синхронное детектирование сигнала, который поступает с выхода маломощного усилителя. Гетеродином для смесителя служит сигнал ГУН, который, поступая с выхода усилителя средней мощности, предварительно

проходит через буфер и полифазный фильтр (PPF). Выходы смесителя представлены квадратурными парафазными сигналами с выходным импедансом 800 Ом и полосой 0–10 МГц. Таким образом, возможно непосредственное детектирование фазы отраженного сигнала, что при длине волны на 24 ГГц в 12,5 мм и ошибке детектора $\pm 10^\circ$ даст погрешность измерения расстояния примерно $\pm 0,3$ мм. Выходы детектора имеют нагрузочную способность 10 кОм. На них присутствует постоянная составляющая порядка $2,3 \pm 0,2$ В. Размах сигнала при компрессии -1 дБ маломощного усилителя составляет 0,6 В; при сильном насыщении он может достигать до 1 В.

Микросхема имеет встроенные датчики с аналоговым выходом:

- температуры;
- выходной мощности гетеродина $V_{\text{вых. гетер.}}$;
- выходной мощности усилителя $V_{\text{вых. перед.}}$;
- опорного напряжения для мощности гетеродина $V_{\text{опорн. гетер.}}$;
- опорного напряжения для мощности усилителя $V_{\text{опорн. перед.}}$, которые коммутируются с помощью аналогового мультимплектора на выход 26 (ANA).

Управляющие значения для мультимплектора представлены в таблице 2 (биты SPI 7, 8, 11).

Для измерения мощности используются пиковые детекторы, подключенные к выходам усилителя средней мощности (УСМ) и усилителя мощности (УМ) соответственно. Опорные напряжения служат для компенсации влияния температуры и напряжения питания. Таким образом, компенсированное значение мощности получается путем вы-

Таблица 1. Ослабление выходной мощности относительно максимума

Данные регистра SPI			Ослабление выходной мощности относительно максимальной, дБ
Бит 2	Бит 1	Бит 0	
0	0	0	0
0	0	1	0,4
0	1	0	0,8
0	1	1	1,4
1	0	0	2,5
1	0	1	4
1	1	0	6
1	1	1	9

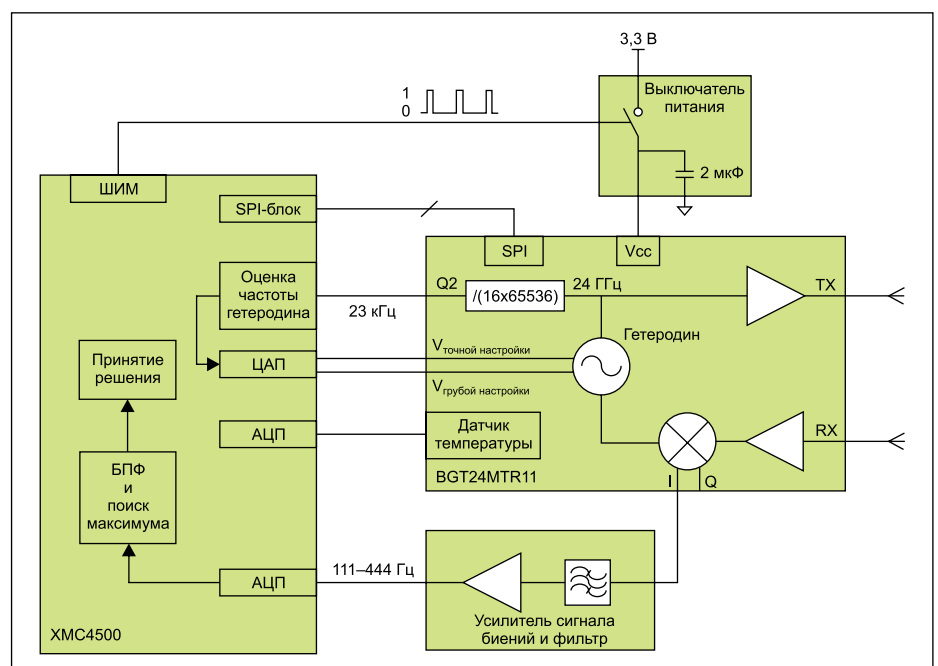


Рис. 6. Пример построения доплеровского импульсного радара на BGT24MTR11 и микроконтроллере XMC4500

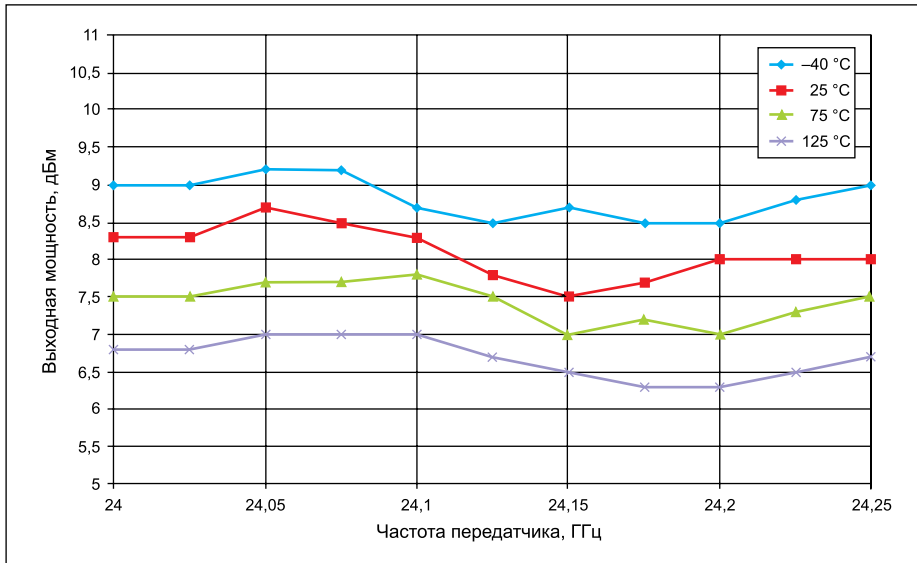


Рис. 7. Зависимость выходной мощности от частоты при разных температурах

Таблица 2. Таблица истинности для аналогового мультиплексора

Сигнал на выходе ANA	AMUX2	AMUX1	AMUX0
Ввых., перед.	0	0	0
Вопорн., перед.	0	0	1
Ввых., гетер.	0	1	0
Вопорн., гетер.	0	1	1
Vtemp.	1	0	0
Тестовый сигнал 1	1	0	1
Тестовый сигнал 2	1	1	0
Тестовый сигнал 3	1	1	1

читания выходного и опорного значений для обоих детекторов (V_{вых.}–V_{опорн.}) и, соответственно, требует двух измерений выхода ANA с переключением коммутатора. Зависимость выходной мощности от этой разности представлена на рис. 8.

Температурный датчик, помимо возможности считывания его через вывод 26, имеет также независимый выход на выводе 30 (TEMP) и независимое питание с вывода 29 (VCCTEMP). Это позволяет считывать дан-

ные с датчика температуры, когда сама микросхема находится в выключенном состоянии. Характеристика температурного датчика приведена на рис. 9.

Микросхема имеет единственный 16-битный регистр SPI, с максимальной частотой тактирования 50 МГц, биты которого как уже было упомянуто ранее, используются для конфигурации режимов работы микросхемы. Его можно перепрограммировать за 360 нс, с учетом интервалов для сигнала /CS. Младший бит записывается первым. Значения битов регистра сведены в таблицу 3.

Оставшийся для рассмотрения третий чип, BGT24MTR12, в отличие от предыдущего, обладает дополнительным каналом приема, что позволяет использовать две разнесенные в пространстве антенны и таким образом измерять угол до объекта, а не только расстояние и/или скорость. Он поддерживает работу лишь в частотном диапазоне 24–24,5 ГГц; в остальном его функциональность идентична BGT24MTR11.

Таблица 3. Описание битов регистра SPI

Биты данных	Название	Описание (при логической 1)	Состояние после включения питания
15 (старший)	GS	Уменьшение усиления МШУ	0
14	—	Не используется	0
13	—	Не используется	0
12	DIS_PA	Мощность передатчика выключена; в случае, когда мощность контролируется через вывод TXOFF, этот бит должен быть равен 0	1
11	AMUX2	Второй бит для контроля аналогового мультиплексора	1
10	Test Bit	Тестовый бит, должен всегда программироваться нулем. Если значение бита при считывании равно 1, это означает отказ микросхемы	0
9	Test Bit	Тестовый бит, должен всегда программироваться нулем. Если значение бита при считывании равно 1, это означает отказ микросхемы	0
8	AMUX1	Первый бит для контроля аналогового мультиплексора	0
7	AMUX0	Нулевой бит для контроля аналогового мультиплексора	0
6	DIS_DIV64k	Делитель на 16 выключен	0
5	DIS_DIV16	Делитель на 65 536 выключен	0
4	PC2_BUF	Буфер гетеродина в режиме повышенной мощности (+4 дБ)	0
3	PC1_BUF	Повышенная мощность буфера передатчика	0
2	PC2_PA	Второй бит для управления мощностью передатчика	1
1	PC1_PA	Первый бит для управления мощностью передатчика	1
0 (младший)	PC0_PA	Нулевой бит для управления мощностью передатчика	1

Применение микросхем семейства BGT24MTRxx

Как уже отмечалось ранее, семейство чипов изначально ориентировано на применение в автомобильной электронике, например для мониторинга мертвых зон автомобиля, удержания в полосе движения и предотвращения столкновений в городских условиях. Достоинством такого рода устройств является их всепогодность, что позволяет водителю вовремя заметить препятствие в условиях плохой видимости. Сейчас такие датчики уже используются в автомобилях высокого клас-

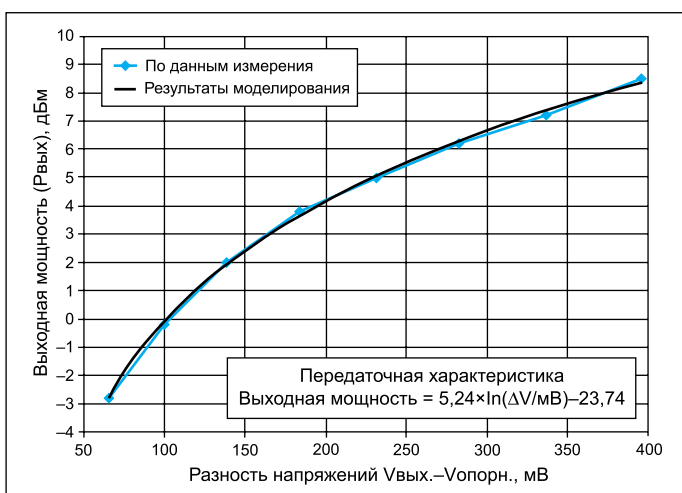


Рис. 8. Передаточная характеристика датчиков мощности

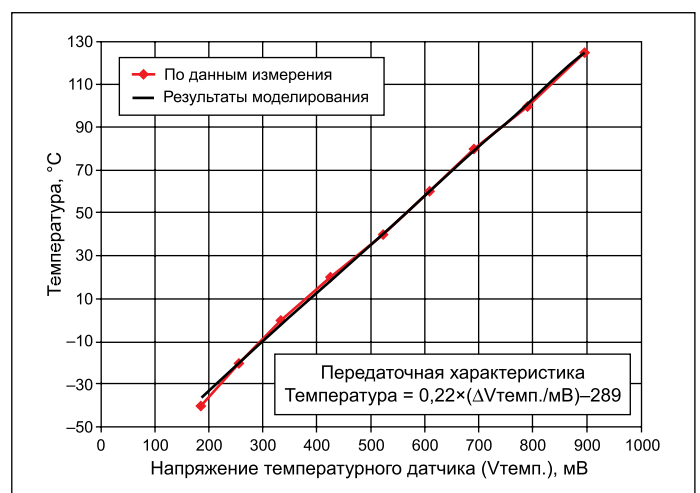


Рис. 9. Температура микросхемы в зависимости от напряжения Vtemp.

са такими автомобильными концернами, как Toyota, BMW, Volkswagen Passat, Mitsubishi, Mercedes и др. Дальность действия подобных устройств обычно не превышает 30 м, поэтому их обычно называют SRR (Short Range Radar), или РКД (радары короткой дистанции). Существует группа стандартов ETSI: TR 101 982V1.1.2(2001-08) «Системные требования для предупреждающих о столкновении автомобильных радаров короткой дистанции» [1].

Помимо автомобилестроения, микросхемы могут найти применение в полицейских радарах, которые необходимы для контроля дорожного движения. Так, одна из лучших стационарных систем, которую выпускает нижегородская компания «Системы Передовых Технологий», — ККДДАС-01 СТ «Стрелка-СТ» работает в диапазоне (24,15 ± 0,1) ГГц. Она контролирует все четыре полосы движения и представляет собой доплеровский радар с импульсом 30 нс и периодом повторения 25 мкс, что дает скважность порядка 830. Исходя из средней мощности в 100 мкВт, это означает мощность импульса порядка 83 мВт или 19,5 дБм. Этот прибор позволяет измерять скорость от 20 до 300 км/ч с точностью до ±1 км/ч на расстояниях до 500 м. Микросхемы BGT24MTRxx, типовая мощность излучения которых составляет 11 дБм, вполне могут подойти для реализации подобных систем. Для формирования наносекундных импульсов можно использовать скоростной коммутатор, например АММС-2008 фирмы Avago. Для усиления мощности можно предложить чип MGF4964BL фирмы Mitsubishi. Реализация подобных усилителей средней мощности, с параллельным включением транзисторов на 24 ГГц рассмотрена в [15].

Следующим применением являются высокоточные радиолокационные датчики расстояния, с точностью до долей миллиметра и выше. В них используются ЛЧМ (линейно частотно модулированные) сигналы. Принцип работы такого дальномера заключается в том, что отраженный от объекта сигнал на синхронном детекторе образует сигнал биений, частота которого прямо про-

порциональна дальности до объекта. Это позволяет измерять дальность до неподвижных или медленно движущихся объектов, что проблематично для доплеровских радаров. Также они актуальны там, где оптические дальномеры не работают, например в условиях запыленности или при плохих погодных условиях. С их помощью можно измерить уровень отвалов породы в горнодобывающей промышленности или расплавленной стали под слоем кокса; нефти в цистернах и т.д. При швартовке судов или стыковках космических аппаратов такого рода датчики могут быть тоже полезны.

Семейство BGT24MTRxx также может быть использовано в датчиках присутствия для охранных систем, автоматических открывателей дверей и системах управления уличным освещением. На них могут быть реализованы системы позиционирования в пространстве, что актуально для больших закрытых помещений, подземных шахт, забоев и горных выработок — там, где сигналы систем GPS и/или ГЛОНАСС недоступны. Подобного рода системы локализации продвигает, например, компания Nanotron. Существует стандарт ETSI TR 102 347 V1.1.1(2004-11) «Радарные измерители уровня. Оборудование для детектирования движения. Системные требования» [3].

Закончим обзор возможных применений такой темой, как подповерхностное зондирование (Ground penetrating/probing) и зондирование стен (Wall probing). Здесь следует отметить, что подповерхностное зондирование дает хорошие результаты лишь на сухих почвах — до 6 м. Такого рода приборы можно использовать для поиска электропроводки, различного рода коммуникаций, труб водоснабжения, зондирования железнодорожных насыпей, покрытия асфальтовых дорог, поиска людей в завалах, при археологических раскопках и т.д. Относительно этих видов применения институт ETSI также выпустил несколько стандартов [2, 4–6].

Законодательная база для использования спектра частот 24–26 ГГц в России

«Это все за рубежом, — скажет читатель. — А что у нас?» А у нас существует Постановление Правительства РФ от 13.10.2011 № 837 «О внесении изменений в Постановление Правительства Российской Федерации от 12 октября 2004 г. № 539» [7]. Вот выдержка из приложения к этому документу: «Изъятия из перечня радиоэлектронных средств и высокочастотных устройств, подлежащих регистрации:

...
26. Устройства для обнаружения передвижения и устройства радиосигнализации в полосе радиочастот 24,05–24,25 ГГц с максимальной эквивалентной изотропно излучаемой мощностью передатчика не более 100 мВт.

...

30. Автомобильные радары ближнего действия в полосе радиочастот 22–26,65 ГГц со спектральной плотностью эквивалентной изотропно излучаемой мощности не более минус 41,3 дБм/МГц, а также автомобильные радары и автомобильные сверхширокополосные радары в полосе радиочастот 76–77 ГГц и 77–81 ГГц.

Таким образом, уже больше года дан «зеленый свет». Дело за разработчиками. ■

Литература

1. Стандарт ETSI TR 101 982V1.1.2 (2001-08). Technical Report Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Radio equipment to be used in the 24 GHz band; System Reference Document for Automotive Collision Warning Short Range Radar.
2. Стандарт ETSI TR 101 994-2 Short Range Devices (SRD); Technical Characteristics for SRD Equipment using Ultra Wide Band technology (UWB); Part 2: Ground and Wall — probing Radar applications; System Reference Document.
3. Стандарт ETSI TR 102 347 V1.1.1 (2004-11) Short Range Devices (SRD); Equipment for detecting movement; Radio equipment operating around, for example, 5,8GHz, 10 GHz, 25 GHz, 61 GHz, 77 GHz; System Reference Document for Tank Level Probing Radar (TLPR).
4. Стандарт ETSI TR 102 554 Code of Practice in respect of the control, use and application of Ground probing radar (GPR) and Wall probing radar (WPR) systems and equipment.
5. Стандарт EN 301 489 — 32 Electro Magnetic Compatibility (EMC) standard for radio equipment and services; Part 32: Specific conditions for Ground and Wall Probing Radar applications.
6. Стандарт EN 302 066-1 Short Range Devices (SRD); Ground and Wall — probing Radar applications; Part 1: Technical characteristics and test methods.
7. Постановление Правительства РФ от 13.10.2011 № 837 «О внесении изменений в Постановление Правительства Российской Федерации от 12 октября 2004 г. № 539».
8. EMM5206LP K band oscillator MMIC. Datasheet. Sumitomo Electric Industries, Ltd.
9. BT24MTR11 Silicon Germanium 24 GHz Transceiver MMIC. Datasheet. Infineon Technologies AG.
10. User's Guide to BGT24MTR11. AN305. Infineon Technologies AG.
11. Using BGT24MTR11 in Low Power Applications. AN341. Infineon Technologies AG.
12. Сысоева С. Актуальные технологии и применения датчиков автомобильных систем активной безопасности. Ч. 6. Радары // Компоненты и технологии. 2007. № 3.
13. Issakov V. Microwave Circuits for 24 GHz Automotive Radar in Silicon-based Technologies. Springer. 2010.
14. Ultrawideband Radar: Applications and Design. Edited by James D. Taylor. CRC Press. 2012.
15. By John Hazell G8ACE. Medium Power Amplifiers for 24Ghz. <http://www.microwaves.dsl.pipex.com/24ghz/24gpa.htm>