УДК 621.382.3

ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОЙ СТАБИЛЬНОСТИ БИПОЛЯРНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ СВЧ ТРАНЗИСТОРОВ, РАБОТАЮЩИХ В ОКОНЕЧНЫХ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДАХ РЛС

Б. В. Емельянов

АО «НПП «Пульсар», 105187, Москва, Окружной проезд, д. 27

Рассматриваются вопросы измерения и расчёта амплитудно-фазовой стабильности. Обоснована необходимость данных расчётов. Приведён алгоритм расчёта амплитудно-фазовой стабильности. Амплитудно-фазовая стабильность – параметр, характеризующий влияние флуктуации амплитуды и фазы сигнала с передатчика радиолокационной станции (РЛС) на коэффициент улучшения алгоритма селекции движущихся целей (СДЦ) станции. Произведён обзор литературы на данную тему. Исследованы вопросы амплитудно-фазовой стабильности выходных радиоимпульсов широкополосных импульсных СВЧ транзисторных усилителей мощности, работающих в передающих и приёмопередающих модулях радиолокационных станций, использующих импульсный сигнал с переменным периодом повторения радиоимпульсов (воббляция). Рассматриваются каскады на биполярных кремниевых СВЧ транзисторах. Рассмотрены факторы, ухудшающие амплитудно-фазовую стабильность. Также проведено математическое моделирование для расчёта зависимости стабильности от различных факторов. При помощи моделирования выявлены основные факторы, влияющие на нестабильность. Получены теоретические зависимости нестабильности при различных тепловых сопротивлениях транзистора с учётом саморазогрева транзистора и при различной флуктуации напряжения питания для разных режимов работы транзистора.

Ключевые слова: амплитудно-фазовая нестабильность, импульсный усилитель мощности, саморазогрев транзистора, селекция движущихся целей, амплитудная стабильность, фазовая стабильность

Сведения об авторе: Емельянов Борис Вячеславович, emelyanov_bv@pulsarnpp.ru

RESEARCH ON AMPLITUDE-PHASE STABILITY OF MICROWAVE PULSED BIPOLAR TRANSISTORS OF RADAR OUTPUT AMPLIFIER STAGES

B. V. Emelyanov

S&PE PULSAR JSC, 105187, Moscow, Okruzhnoy proezd, 27

In this paper the issues of amplitude-phase stability measurement and simulation are considered. The necessity of such simulation is rationalized. Algorithm for amplitude-phase stability simulation is given. Amplitude-phase stability is a parameter characterizing the influence of fluctuations in the amplitude and phase of a radar transmitter signal on the coefficient of improvement of the algorithm for moving-target indication. A literature review was conducted on the subject. The issues of amplitude-phase stability of the output radio-pulses of broadband microwave pulsed transistor power amplifiers operating in the transmitting and transmitting-receiving modules of radars using a pulse signal with a variable repetition period of radio-pulses (wobble) are investigated. Stages of microwave silicon bipolar transistors are considered. The factors negatively affecting the amplitude-phase stability are considered. Mathematical modeling was also carried out to simulate the dependence of stability on various factors. Using modeling, the main instability factors were identified. The theoretical dependences of instability are obtained for various thermal resistances of the transistor, taking into account transistor self-heating, and for various fluctuations in the supply voltage in different operating modes.

Keywords: amplitude-phase instability, pulsed power amplifier, transistor self-heating, moving-target indication, amplitude stability, phase stability

Authors: Emelyanov Boris Vyacheslavovich, emelyanov_bv@pulsarnpp.ru

Введение

Для обеспечения избирательности РЛС по объектам обнаружения в станции применяется фильтр селекции движущихся целей (СДЦ) [1]. Данный фильтр позволяет локатору не учитывать сигналы от неподвижных и малоподвижных целей, тем самым обеспечивая отсутствие ложных срабатываний как от наземных целей, так и от атмосферных явлений. Для фильтрации сигналов от неподвижных целей происходит вычитание двух последовательных радиоимпульсов, отражённых от объекта. Если амплитуда и фаза отражённого сигнала совпадает – на выходе фильтра уровень сигнала равен нулю. Таким образом из обзора РЛС убираются неподвижные объекты. Флуктуации сигнала в передатчике и приёмной части РЛС вносят ухудшение в систему СДЦ, поскольку приносят разность фаз и амплитуд между импульсами.

Для определения критерия влияния флуктуации сигнала выходных усилительных модулей РЛС на систему СДЦ и определения критерия годности передатчика ввели параметр, определяющий стабильность выходного сигнала с усилителя, – амплитудно-фазовую стабильность. Для обеспечения корректной работы системы СДЦ в большинстве РЛС необходимо, чтобы уровень амплитудно-фазовой стабильности был не ниже 50 дБ. Амплитудно-фазовая стабильность применительно к СДЦ – это коэффициент, отображающий уровень изменения фазы и амплитуды от импульса к импульсу как в тракте передатчика, так и в тракте приёмника РЛС. Чем

больше разница между последовательными импульсами, тем меньше уровень подавления сигналов от неподвижных объектов в фильтре СДЦ.

В современной отечественной литературе не рассматривался вопрос измерения и расчёта амплитудно-фазовой стабильности передатчиков РЛС. В зарубежной литературе приводят исследования зависимости амплитудно-фазовой нестабильности для транзисторов на нитриде галлия. В статье [2] рассматривается вопрос необходимости измерения амплитудно-фазовой стабильности и несколько способов расчёта амплитудно-фазовой стабильности. В статье [3] рассматриваются основные причины, ухудшающие стабильность GaN транзисторов, а также зависимость стабильности GaN транзистора от расстановки радиоимпульсов. Но похожих расчётов для кремниевых биполярных транзисторов не было найдено, поэтому для обеспечения высокой стабильности передатчиков на биполярных транзисторах появилась необходимость произвести теоретический расчёт стабильности биполярных транзисторов.

Данная работа была проведена для исследования зависимости уровня той составляющей амплитудно-фазовой нестабильности, которая определяется выходными усилительными каскадами в зависимости от различных факторов.

Алгоритм определения амплитудно-фазовой нестабильности

Алгоритм анализирует цифровой комплексный сигнал, полученный при помощи векторного цифрового приёмника.

Рис. 1

Последовательность радиоимпульсов с переменным периодом повторения

На рис. 1 показан пример последовательности радиоимпульсов с переменным периодом повторения. Сигнал состоит из пачек радиоимпульсов, пауза между пачками t_{n2} . Каждая пачка состоит из двух радиоимпульсов. Для каждого радиоимпульса проводятся измерения амплитуды и фазы при фиксированном времени от начала импульса t_0 . После накопления, достаточного для анализа массива амплитуд и фаз, проводится дискретное преоб-

разование Фурье данного массива и измеряется отношение уровня основной гармоники к сумме уровней побочных гармоник. Данное отношение является уровнем амплитудно-фазовой нестабильности. В большинстве РЛС для корректной работы СДЦ уровень амплитудно-фазовой нестабильности применительно к усилителю мощности должен быть ниже -50 дБ. Для количественного определения влияния амплитудной флуктуации и отдельно

Рис. 2

Результат преобразования Фурье действительной части (амплитуды) массива; нестабильностью является отношение суммы амплитуд гармоник между красными линиями (в центре) к остальным гармоникам

Рис. 3

Результат преобразования Фурье комплексного массива; нестабильностью является отношение амплитуд гармоник между красными линиями (в центре) к остальным гармоникам

фазовой флуктуации на уровень амплитудно-фазовой нестабильности также было проведено измерение амплитудной нестабильности. Амплитудная нестабильность рассчитывается аналогичным образом, но для дискретного преобразования Фурье выделяется только действительная часть массива. На основании данного алгоритма была написана программа расчёта амплитудной и амплитудно-фазовой нестабильности. Массив для этой программы формировался путём расчёта амплитуды

и фазы соседних радиоимпульсов с заданной паузой между ними. Для корректного расчёта амплитудно-фазовой нестабильности при помощи дискретного преобразования Фурье необходим массив как минимум из 32 значений. Поэтому в каждую нечётную ячейку массива было записано значение амплитуды и фазы первого радиоимпульса, а в каждую чётную – второго радиоимпульса. На рис. 2 показан результат преобразования Фурье амплитуды сигнала, на рис. 3 – результат преобразования Фурье комплексного сигнала.

Описание методики моделирования

Определение параметров выходного сигнала транзистора проводилось при помощи программы моделирования компактной модели транзистора [4]. Данная программа моделирования позволяет рассчитывать выходной радиосигнал во временной области. При помощи этой программы проводился расчёт амплитуды и фазы выходных радиоимпульсов. В данной модели не учитывалось тепловое сопротивление транзистора, поэтому была написана отдельная программа моделирования температуры транзистора во времени при различных параметрах импульсного сигнала и различном тепловом сопротивлении транзистора. Данные из программы расчёта температуры транзистора подставлялись в программу моделирования транзистора. После получения результатов моделирования данные об амплитудах и фазах импульсного СВЧ сигнала были проанализированы при помощи программы расчёта амплитудно-фазовой стабильности.

Факторы, влияющие на амплитудно-фазовую стабильность

На амплитудно-фазовую стабильность выходных радиоимпульсов с переменным периодом повторения влияют несколько факторов, которые можно разделить на два типа: детерминированные и недетерминированные. Недетерминированные факторы характеризуют амплитудный и фазовый шум выходного радиосигнала. К недетерминированным факторам можно отнести собственные шумы транзистора и пассивных элементов, шумы источника питания. К детерминированным можно отнести

факторы, зависящие от расстановки радиоимпульсов. Детерминированные факторы обусловлены долгими (по сравнению с несущей частотой) переходными процессами. В данной работе для расчётов были приняты постоянными импедансы входной, выходной нагрузки и уровень входной СВЧ мощности. Для расчёта была использована модель биполярного транзистора со следующими параметрами: выходная импульсная мощность – 200 Вт, рабочая частота от 2,7 до 2,9 ГГц, напряжение питания – 41 В, коэффициент усиления – 8 дБ, входная импульсная мощность – 35 Вт. При использовании биполярных транзисторов в усилительных каскадах основной вклад в ухудшение стабильности вносят два фактора.

1. Нестабильность напряжения питания усилительных каскадов

Флуктуация напряжения питания каскада обусловлена конструкцией источника питания, характером нагрузки на блок питания и накопительной ёмкостью. Уровень напряжения питания транзистора влияет на выходную мощность и фазу выходного сигнала транзистора. Для определения зависимости стабильности сигнала от уровня флуктуации напряжения питания был проведён расчёт амплитуды и фазы сигнала при различных уровнях напряжения. Далее был составлен массив из комплексных чисел с последовательным чередованием значений амплитуды и фазы выходного сигнала усилителя при номинальном уровне напряжения сигнала и при напряжении, сдвинутом на прогнозируемый уровень флуктуации напряжения. Также был проведён расчёт амплитудно-

фазовой стабильности каскада с девиацией напряжения при различном согласовании выходной цепи транзистора. На рис. 4 показан график зависимости амплитудно-фазовой стабильности от флуктуации напряжения питания при различных режимах работы транзистора. График с большей стабильностью соответствует линейному режиму работы транзистора.

зрения коэффициента полезного действия (КПД) и выходной мощности для импульсных усилителей мощности РЛС. Соответственно при выборе режима работы транзистора необходимо соблюдать компромисс между амплитудно-фазовой стабильностью, КПД и выходной мощностью. Также при флуктуациях питания появляется разница между амплитудной и ампли-

Рис. 4

Зависимость амплитудно-фазовой стабильности от флуктуации напряжения питания при различных режимах работы транзистора

Результаты моделирования и их интерпретация

В табл. 1 указаны зависимости амплитудно-фазовой нестабильности от изменения уровня флуктуации напряжения питания при различных режимах работы транзистора. Можно сделать вывод, что в линейном режиме нестабильность ниже, чем в режиме насыщения. Но линейный режим не является оптимальным с точки

зрения амплитудно-фазовой нестабильностью примерно в 10 дБ, из чего можно сделать вывод о том, что флуктуации напряжения питания сильнее влияют на стабильность фазы.

В многокаскадных усилителях мощности, разработанных автором, для обеспечения уровня амплитудно-фазовой нестабильности были применены линейные стабилизаторы напряжения с максимальным выходным током, превышающим

импульсный ток потребления транзистора, что позволило обеспечить уровень нестационарности ниже -55 дБ.

2. Саморазогрев транзистора

Температура перехода транзистора зависит от теплоёмкости и теплопроводности различных слоёв и элементов транзистора. Поскольку данные структуры имеют различную теплоёмкость и теплопроводность, рост температуры во время радиоимпульса нелинеен. Тепловые параметры транзистора можно описать при помощи эквивалентной схемы из нескольких

За время паузы между импульсами температура перехода может не успеть вернуться к исходной. В случае переменного периода повторения разная температура перехода в момент начала радиоимпульса будет влиять на стабильность выходного сигнала, поскольку температура транзистора влияет на амплитуду и фазу выходного сигнала каскада. Для анализа зависимости стабильности от теплового сопротивления транзистора была написана программа, позволяющая теоретически рассчитать температуру транзистора во времени. На рис. 5 показаны результаты

Рис. 5

Зависимость температуры перехода транзистора от времени

последовательно соединённых гс-цепочек. Каждая гс-цепочка соответствует определённой структуре транзистора, сопротивление гс-цепочки характеризует теплопроводность, а номинал конденсатора — теплоёмкость.

моделирования саморазогрева транзистора при импульсном сигнале.

Далее расчётная температура подставлялась в программу моделирования транзисторов для расчёта амплитуды и фазы

сигнала. Был проведён расчёт амплитудно-фазовой неустойчивости при различных значениях теплового сопротивления транзисторов. Результаты представлены в табл. 2. Из полученных результатов можно сделать вывод, что при линейном росте теплового сопротивления также

линейно растёт амплитудно-фазовая неустойчивость. При этом уровень амплитудной неустойчивости практически идентичен уровню амплитудно-фазовой неустойчивости, что свидетельствует о том, что повышение теплового сопротивления не сильно влияет на уровень фазовой стабильности.

Таблица 1

Зависимость неустойчивости от флуктуации напряжения питания в режиме насыщения и линейном режиме работы транзистора

dU , В	Режим насыщения		Линейный режим	
	Амплитудная неустойчивость, дБ	Амплитудно-фазовая неустойчивость, дБ	Амплитудная неустойчивость, дБ	Амплитудно-фазовая неустойчивость, дБ
0,01	-73,7	-68,8	-81,2	-71,6
0,05	-59,4	-55,1	-66,858	-57,5
0,1	-53,4	-49,0	-60,9	-51,5
0,2	-47,4	-43,0	-55,1	-45,5
0,3	-43,9	-39,5	-51,7	-42,0

Таблица 2

Зависимость неустойчивости от изменения импульсного теплового сопротивления транзистора

Тепловое сопротивление, К/Вт	Амплитудная неустойчивость, дБ	Амплитудно-фазовая неустойчивость, дБ
0,2	-67,8	-67,7
0,4	-62,8	-62,8
0,6	-58,9	-58,8
0,8	-55,7	-55,6
1,0	-53,3	-53,3

Выводы

На амплитудно-фазовую стабильность каскадов на биполярных СВЧ транзисторах влияют два основных фактора – саморазогрев транзистора и флуктуация напряжения питания.

Для обеспечения стабильности не менее 50 дБ флуктуация напряжения питания должна быть не более 50 мВ в режиме насыщения и не более 100 мВ в линейном режиме работы транзистора.

Импульсное тепловое сопротивление рассматриваемого в статье транзистора должно быть менее 1 К/Вт, чтобы обеспечить амплитудно-фазовую стабильность

каскада более 50 дБ. Типовое импульсное сопротивление данного транзистора 0,2 К/Вт, но не превышает 0,3 К/Вт (производится контроль каждого транзистора по этому параметру).

На основании теоретических исследований автором были разработаны усилители мощности с амплитудно-фазовой стабильностью более 50 дБ для РЛС: Лира-Т, Лира-А10, Сопка-2 и Наблюдатель [5-7].

Литература

1. Справочник по радиолокации: В 2-х книгах. – / Под ред. М.И. Скольникова, Книга 1. – 2014. – 672 с.
2. Аронов, В.Л. Моделирование мощного биполярного транзистора в усилительном режиме с учётом квазинасыщения / В.Л. Аронов, А.А. Евстигнеев – Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 2005. – вып. 1-2. – С. 24-33.
3. C. Salmer, P. Eudeline, and P. A. Rolland Pulse to pulse stability of solid state transmitter module for radars application. Published in 28th European Microwave Conference. 5-9 Oct. 1998, с. 79–84. DOI: 10.1109/EUMA.1998.338129
4. P. Eudeline, M. Campovecchio, D. Barataud, G. Neveux Time-domain envelope measurements and simulations of pulse-to-pulse stability in microwave power amplifiers. IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014), 1-6 June 2014. DOI: 10.1109/MWSYM.2014.6848335
5. Емельянов, Б.В. Мощный импульсный выходной усилитель мощности S-диапазона изделие шифр «Наблюдатель-П» / Б.В. Емельянов // Материалы XIV научно-технической конференции, «Пульсар-2015»; Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА, 7-9 октября 2015, Москва. – М.: ОАО «НПП «Пульсар», 2015. – С.144.
6. Емельянов, Б.В. Мощные импульсные твердотельные передающие модули S-диапазона для трассовых РЛК «Лира», «Сопка-2» и «Наблюдатель» / Б.В. Емельянов // Материалы Международной конференции «Микроэлектроника

2015»; «Интегральные схемы и микроэлектронные модули - проектирование, производство и применение», 28.09-03.10.2015. Крым, Алушта. – М.: Рекламно-издательский центр «Техносфера».

7. Емельянов, Б.В. Мощный широкополосный приёмопередающий модуль S-диапазона для АФАР / Б.В. Емельянов // Материалы XV научно-технической конференции, «Пульсар-2017»; Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА, 27-29 сентября 2017, Москва-Дубна. – М.: АО «НПП «Пульсар». – С. 277.

References

1. Spravochnik po radiolokatsii [Handbook on radiolocation], Tome 1, 2014, 672 p.
2. Aronov V.L., Evstigneev A.A. Modelirovaniye moshchnogo bipolar'nogo tranzistora v usilitel'nom rezhime s uchotom kvazinasyscheniya [Modeling a power bipolar transistor in an amplifying mode with quasi-saturation]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2005, iss. 1-2, pp. 24-33.
3. Salmer C., Eudeline P., Rolland P. A. Pulse-to-pulse stability of solid state transmitter module for radar application. *28th European Microwave Conference*, 5-9 Oct. 1998, pp. 79–84. DOI: 10.1109/EUMA.1998.338129
4. Eudeline P., Campovecchio M., Barataud D., Neveux G. Time-domain envelope measurements and simulations of pulse-to-pulse stability in microwave power amplifiers. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014)*, 2014. DOI:10.1109/MWSYM.2014.6848335
5. Emelyanov B.V. Moshchnyy impul'snyy vykhodnoy usilitel' moshchnosti S-diapazona izdeliye shifr «Nablyudatel'-P» [S-band output pulsed power amplifier, product code «Nablyudatel'-P»]. *Materialy XIV nauchno-tekhnicheskoy konferentsii Pulsar-2015. Tverdotel'naya elektronika. Slozhniye funktsional'niye bloki REA*, Moscow, 2015, S&PE Pulsar JSC, 144 p.
6. Emelyanov B.V. Moshchnyye impul'snyye tverdotel'nyye peredayushchiye moduli S-diapazona dlya trassovykh RLK «Lira», «Sopka-2» i «Nablyudatel'» [S-band pulsed power solid-state transmitting modules for en-route radars «Lira»,

- «Sopka-2» and «Nablyudatel'»). *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii Mikroelektronika-2015. Integral'nyye skhemy i mikroelektronnyye moduli - proyektirovaniye, proizvodstvo i primeneniye*. Moscow, 2015, Tekhnosfera.
7. Emelyanov B.V. Moshchnyy shirokopolosnyy priyomopere dayushchiy modul' S-diapazona dlya AFAR [S-band broadband power transceiver module for AESA array]. *Materialy XV nauchno-tekhnicheskoy konferentsii Pulsar-2017. Tverdotel'naya elektronika. Slozhniye funktsional'niye bloki REA*, Moscow, 2017, S&PE Pulsar JSC, 277 p.