УДК 621.396.67

КОРРЕКТИРУЮЩИЙ МЕТОД АДАПТАЦИИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ К ВЛИЯНИЮ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ АНТЕННО-ФИДЕРНЫХ ТРАКТОВ

Гурский С.М.

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны
Российской Федерации, Санкт-Петербург, e-mail: sergeygurskiy2018@yandex.ru

В статье предложен подход к количественной оценке влияния механических повреждений в виде вмятин, пробоин, прогибов элементов антенно-фидерного тракта радиотехнической системы на амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики антенно-фидерного тракта. Указанные повреждения рассматриваются как нерегулярности антенно-фидерных трактов, которые являются источником амплитудно-фазо-частотных искажений широкополосных сигналов в радиотехнических системах. При этом показано, что наиболее существенно проявляются гармонические искажения фазы широкополосных сигналов как результат интерференции, падающей и отраженной от нерегулярности волн. Следствием искажений является деформация фазочастотного спектра широкополосных сигналов на выходе согласованного фильтра, изменение формы и амплитуды автокорреляционной функции широкополосных сигналов. Для ослабления негативного влияния повреждений на характеристики антенно-фидерного тракта предложен корректирующий метод адаптации радиотехнических систем к влиянию указанных повреждений, а также технические решения, направленные на улучшение условий наблюдаемости полезных сигналов на фоне помех в условиях появления механических повреждений. Внедрение предложенного в статье метода адаптации радиотехнических систем к влиянию повреждений антенно-фидерных трактов (АФТ) в виде вмятин и пробоин может позволить повысить отношение сигнал – помеха на величину до 10 дБ по сравнению с известными в условиях осколочного воздействия эвентуального противника. Новизна предлагаемого метода и технических решений подтверждается двумя патентами Российской Федерации на изобретения.

Ключевые слова: антенно-фидерный тракт, радиотехническая система, широкополосный сигнал, автокорреляционная функция, уровень боковых лепестков, автоматический корректор амплитудно-частотной характеристики

CORRECTIVE METHOD OF ADAPTATION OF RADIO ENGINEERING SYSTEMS TO THE INFLUENCE OF DAMAGE TO ELEMENTS OF ANTENNA-FEEDER PATHS

Gurskiy S.M.

*Federal State Budgetary Military Educational Institution of Higher Education
«The Mozhaisky Military Space Academy» of the Ministry of Defence of the Russian Federation,
Saint-Petersburg, e-mail: sergeygurskiy2018@yandex.ru*

The article offers an approach to quantifying the impact of mechanical damage in the form of cracks, holes, deflections of elements of the antenna-feeder path of a radio engineering system on the amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of the antenna-feeder path. These damages are considered as irregularities of antenna-feeder paths, which are a source of amplitude-phase-frequency distortion of broadband signals in radio engineering systems. At the same time, it is shown that the most significant harmonic distortion of the phase of broadband signals is the result of interference incident and reflected from the irregularity of waves. The distortion results in the de-formation of the phase-frequency spectrum of broadband signals at the output of the matched filter, and changes in the shape and amplitude of the autocorrelation function of broadband signals. To reduce the negative impact of damage on the characteristics of the antenna-feeder path, a corrective method of adapting radio engineering systems to the influence of these damages, as well as technical solutions aimed at improving the observability of useful signals against the background of interference in the conditions of mechanical damage, is proposed. The implementation of the proposed method of adapting radio engineering systems to the impact of damage to antenna-feeder paths (aft) in the form of dents and holes can increase the signal-to-noise ratio by up to 10 dB compared to those known in the conditions of fragmentation impact of an even enemy. The novelty of the proposed method and technical solutions is confirmed by two patents of the Russian Federation for inventions.

Keywords: antenna-feeder path, radio engineering system, broadband signal, autocorrelation function, side lobe level, automatic correction of amplitude-frequency response

Следствием влияния поражающих факторов оружия на радиотехнические системы (РТС) является появление повреждений в виде вмятин, пробоин и прогибов антенно-фидерных трактов. Указанные повреждения рассматриваются как нерегулярности антенно-фидерных трактов, которые являются источником амплитудно-фазо-частотных искажений широкопо-

лосных сигналов РТС. При этом наиболее существенно проявляются гармонические искажения фазы широкополосных сигналов как результат интерференции, падающей и отраженной от нерегулярности волн. Следствием искажений является деформация фазочастотного спектра широкополосных сигналов на выходе согласованного фильтра, изменение формы и амплитуды

автокорреляционной функции широкополосных сигналов.

В связи с этим представляет интерес оценка изменения автокорреляционной функции широкополосных сигналов в зависимости от степени повреждения антенно-фидерных трактов и определение компенсационных мер по результатам фазовых возмущений – корректирующего метода

адаптации РТС к влиянию повреждений антенно-фидерного тракта.

Материалы и методы исследования

В случае гармонического фазового возмущения вида $\varphi(\omega) = \varphi_{\max} \sin \Omega t$ выходной широкополосный сигнал согласованного фильтра определяется выражением

$$v(t) = I_0(\varphi_{\max})v_0(t) + \sum_{n=1}^{\infty} \left[I_n(\varphi_{\max})v_0(t + n\Omega/\beta_0) + (-1)^n I_n(\varphi_{\max})v_0(t - n\Omega/\beta_0) \right], \quad (1)$$

где $v_0(t)$ – автокорреляционная функция искаженного широкополосного сигнала;
 $I_0(\varphi_{\max}), I_n(\varphi_{\max})$ – функции Бесселя;
 β_0 – скорость частотной девиации.

Во временной области широкополосный сигнал представляет сумму неискаженного сигнала и расположенных симметрично от него парных эхо, удаленных от центрального пика автокорреляционной функции на величину $n\Omega/\beta_0$ [1]. Частота искажений равна $\Omega = 2\pi m / \Delta t$. Число осцилляций m фазы в диапазоне изменения частоты $\Delta\omega$ можно определить по фазовой скорости V_{ph} и расстоянию l_{irreg} до нерегулярности $\Delta\omega 2l_{irreg} / 2\pi V_{ph}$. При $l_{irreg} / V_{ph} \approx 1 / 2\Delta F$ парные эхо располагаются в районе первого минимума сжатого широкополосного сигнала [2]. Для современных РТС величина m составляет 5–10% от значения несущей частоты, а длина открыто расположенных АФТ l_{ATS} может достигать десятков метров. Отсюда следует, что наиболее вероятные значения m будут располагаться в диапазоне 0,5–10. При этом для максимальных значений m парные эхо будут располагаться на значительном удалении от центрального пика автокорреляционной функции широкополосных сигналов и не будут маскировать отметки от близкорасположенных целей. По этой причине наибольший интерес представляет оценка изменений автокорреляционной функции широкополосных сигналов при $m = 0,5 \dots 3$.

Результаты исследования и их обсуждение

В [3] приведена оценка изменений автокорреляционной функции сигнала для значения $m = 0,5$ и фиксированных величин коэффициентов отражения волны для двух нерегулярностей в антенно-фидерных трактах. Полученные результаты необходимо дополнить расчетом автокорреляционной функции широкополосных сигналов для других значений m и изменяемых величин коэффициентов отражения.

Максимальное значение фазового возмущения можно оценить по фазочастотной характеристике (ФЧХ) усилительного элемента сверхвысокой частоты (СВЧ), нагруженного на антенно-фидерные тракты с нерегулярностями (то есть с повреждениями) [4]:

$$\varphi_{\max} \approx \arctg \frac{KP}{\sqrt{1 - (KP)^2}}, \quad (2)$$

где K – коэффициент передачи усилителя по напряжению; $P = \Gamma_1 \Gamma_2 e^{-\alpha_{ATS} l_{ATS}}$ – произведение модулей коэффициентов отражения от соответствующих нерегулярностей (повреждений) антенно-фидерных трактов; α_{ATS} – постоянная затухания в антенно-фидерных трактах.

При условии равенства величины K единице в формуле (2), рассчитанный по формуле (1) уровень боковых лепестков для $m = 2,3$ в зависимости от величины P или коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН или K_{sw}) для различных степеней повреждения антенно-фидерных трактов и с учетом весовой обработки составил 0,3 при $K_{sw} = 10$. Ухудшение отношения сигнал – шум в случае безвесовой обработки для значений $m = 2,3$ составляет примерно 4 дБ.

В соответствии с критериями ухудшения, принятыми в [2, 5], диапазон изменений КСВН K_{sw} и соответствующим им повреждения по степени увеличения уровня боковых лепестков следует разделить на три участка – слабые, сильные и очень сильные.

Расчет автокорреляционной функции для случая непериодических гармонических искажений ($m = 0,5$) показал, что при четной функции фазового возмущения уровень центрального пика с ростом K_{sw} снижается, импульс расширяется и при больших значениях K_{sw} расщепляется пополам.

При этом уровень боковых лепестков автокорреляционной функции широкополосных сигналов возрастает на 1,6 дБ, а цен-

тральный пик снижается на 1 дБ. На уровне 0,7 импульс расширяется на 50 %. В случае нечетной функции фазового возмущения происходит смещение центрального пика автокорреляционной функции широкополосных сигналов по оси времени на величину, пропорциональную K_{sw} или φ_{max}/π . Нарушение симметрии центрального пика автокорреляционной функции широкополосных сигналов сопровождается перераспределением энергии и возрастанием уровня правого бокового пика на величину до 2 дБ.

Таким образом, нерегулярности, возникающие в антенно-фидерном тракте при его повреждении в результате воздействия поражающих факторов оружия, приводят к росту уровня боковых лепестков автокорреляционной функции широкополосных сигналов и изменению её формы. При этом в силу случайного характера степени и места повреждения антенно-фидерных трактов РТС, различные по характеру фазовые возмущения порождают различные деформации автокорреляционной функции

сигнала. Анализ результатов расчета приводит к выводу о необходимости адаптивной коррекции искажений автокорреляционной функции широкополосных сигналов по результатам фазовых возмущений, вызванных в том числе и повреждениями антенно-фидерных трактов.

Пути адаптации РТС к повреждениям антенно-фидерного тракта

В этих целях предлагается устройство [6], структурная схема которого представлена на рис. 1. Изображенный на рис. 1 автоматический корректор амплитудно-частотной характеристики антенно-фидерного тракта РТС содержит: направленный НО1 и ненаправленный НО2 ответвители, линии задержки (ЛЗ1 и ЛЗ2), вентили (В1 и В2), дисперсионный анализатор спектра (ДАС), дискретизатор (Диск.) с n -выходами, запоминающее устройство (ЗУ), электронный коммутатор (К), формирователь управляющих сигналов (ФУС), управляемые входы согласователя (УВхС), собственно согласователи (Соглас.).

Рис. 1. Структурная схема корректора амплитудно-частотной характеристики антенно-фидерного тракта с повреждениями

Принцип работы автоматического корректора основывается на внесении согласователями (Соглас.) в фазочастотную характеристику антенно-фидерного тракта фазочастотных поправок по сигналам управления, вырабатываемым в формирователе управляющих сигналов (ФУС) устройством сравнения одноимённых n кодовых спектральных посылок искаженного в частично повреждённом антенно-фидерном тракте и неискаженного излучаемых сигналов. В качестве согласователей используются n электрически управляемых взаимных фазовращателей на основе сегнетоэлектриков.

Время срабатывания устройства (40–50) мкс и определяется как

$$T = 2\tau_c + \tau_{изм} + \tau_{АФТ} + \tau_{сраб},$$

где τ_c – длительность зондирующего сигнала;

$\tau_{изм}$ – время измерения и преобразования спектра сигнала;

$\tau_{АФТ}$ – время прохождения зондирующего сигнала в тракте СВЧ;

$\tau_{сраб}$ – время срабатывания согласователей.

Автоматический корректор амплитудно-частотной характеристики антенно-фидерного тракта с повреждениями работает следующим образом.

Рассмотрим сначала случай коррекции амплитудно-частотной характеристики при малых искажениях сигнала антенно-фидерным трактом. Этот случай поясняется эпюрами (рис. 2) напряжений при использовании сигнала в виде радиоимпульса с прямоугольной формой огибающей.

Сверхвысокочастотный генератор в момент времени t_0 прихода импульса запуска формирует опорный сигнал (рис. 2, (1) а), который со входа антенно-фидерного тракта через направленный ответвитель НО1 и вентиль В1, который может быть включен для улучшения развязки, поступает на вход дисперсионного анализатора спектра ДАС. На вход ДАС в момент времени t_2 поступает также сигнал с выхода антенно-фидерного тракта через ненаправленный ответвитель НО2, первую линию ЛЗ1 задержки и вентиль В2, который может быть включен для улучшения развязки (рис. 2, (1) з). При этом момент времени $t_2 = t_0 + \tau_{изм} + \tau_c$, где $\tau_{изм}$ – время, необходимое для обработки сигнала в измерителе (в составе последовательно соединённых ДАС, Диск. и ЗУ) с учетом переходных процессов, τ_c – длительность опорного сигнала, а время задержки первой линии ЛЗ1 задержки равно $\tau_{ЛЗ1} = (\tau_c - \tau_{АФТ}) + \tau_{изм}$, где $\tau_{АФТ}$ – время задержки сигнала антенно-фидерным трактом. За время $(t_2 - t_0)$ с выхода дисперсионного анализатора спектра ДАС на вход

дискретизатора (Дискр.) поступает спектр опорного сигнала (рис. 2, (1) б). На выходе дискретизатора (Дискр.) образуется N амплитудных значений каждой из N частотно-временной дискреты в цифровом коде (рис. 2, (1) в), которые поступают в запоминающее устройство (ЗУ). С выхода запоминающего устройства (ЗУ) в момент времени $t_1 = t_0 + \tau_{изм}$ спектр опорного сигнала в цифровом коде поступает через электронный коммутатор (К) на вход второй линии ЛЗ2 задержки. Аналогичным образом, в момент времени $t_3 = t_2 + \tau_{изм} = t_0 + \tau_c + 2\tau_{изм}$ начинает формироваться спектр сигнала, прошедшего антенно-фидерный тракт и через электронный коммутатор (К) поступает на 1, ..., N входы формирователя управляющих сигналов (ФУС) (рис. 2, (1) д, е). В этот же момент времени t_3 спектр опорного сигнала, задержанный второй линией ЛЗ2 задержки на время $\tau_{ЛЗ2} = \tau_c + \tau_{изм}$, поступает на $(N + 1, ..., 2N)$ входы формирователя управляющих сигналов (ФУС) (рис. 2, (1) ж).

Формирователь управляющих сигналов (ФУС) настроен так, что при малых искажениях сигнала, а следовательно, и его спектра антенно-фидерным трактом амплитуды N дискрет на $(1, ..., N)$ входах ФУС равны амплитудам соответствующих N дискрет на $(N + 1, ..., 2N)$ входах ФУС. Поэтому напряжение на выходе ФУС, а следовательно, и на выходе управляемых входах согласователя (УВхС) равно нулю (рис. 2, (1) и рис. 2, (2)), т.е. напряжение на управляющих входах блока N согласователей отсутствует и все согласователи (фазовращатели) остаются в исходном положении и коррекции амплитудно-частотной характеристики антенно-фидерного тракта не происходит.

Рассмотрим теперь случай коррекции амплитудно-частотной характеристики при больших искажениях сигнала антенно-фидерным трактом. Данный случай поясняется эпюрами рис. 2, (2) также при использовании сигнала в виде радиоимпульса с прямоугольной формой огибающей. Формирование спектров опорного сигнала и сигнала, прошедшего антенно-фидерный тракт, происходит аналогично рассмотренному выше случаю (рис. 2, (1) а – е), однако из-за больших искажений сигнала, амплитуды N дискрет на $(1, ..., N)$ входах ФУС существенно отличаются от амплитуд соответствующих N дискрет на $(N + 1, ..., 2N)$ входах ФУС (рис. 2, (2) е и 2, (2) ж). Поэтому на выходе ФУС появляется напряжение (рис. 2, (2) з) в цифровом коде, пропорциональное разности амплитуд соответствующих – дискрет сравниваемых спектров, под действием которого

управляемые входы согласователя (УВхС) выработает N управляющих напряжений таких величин и полярностей (рис. 2, (2) и) при которых последующая перестройка согласователей (фазовращателей) приводит к полному или частичному устранению искажений спектра сигнала, прошедшего антенно-фидерный тракт.

Предлагаемое устройство позволяет также устранить рассогласование между нагрузкой (антенной) и антенно-фидерным трактом, если параметры нагрузки изменяются.

Достоинством предлагаемого устройства является возможность коррекции фазо-частотной и амплитудно-частотной характеристик антенно-фидерных трактов РТС в широкой полосе частот при наличии повреждений в виде вмятин и прогибов в элементах антенно-фидерных трактов.

Вместе с тем появление пробоев на элементах антенно-фидерных трактов (рис. 3)

может привести к неоправданному увеличению потерь, связанных с паразитным излучением электромагнитной энергии.

Для существенного снижения последних предлагается адаптировать антенно-фидерный тракт РТС к механическим повреждениям в виде пробоев. При этом указанная адаптация заключается в восстановлении основных параметров частично поврежденного антенно-фидерного тракта до уровня, приближающегося к исходному уровню – неповрежденного антенно-фидерного тракта РТС (рис. 4).

Одним из путей такой адаптации является создание антенно-фидерных трактов РТС, открыто расположенная пассивная часть которых покрывается однослойными или многослойными оболочками, обладающими способностью самовосстанавливать электродинамические параметры антенно-фидерных трактов в местах осколочных и пулевых пробоев.

(1)

(2)

Рис. 2. Эпюры напряжений, поясняющие принцип работы автоматического корректора амплитудно-частотной характеристики соответственно для случаев малых (1) и больших (2) искажений сигнала антенно-фидерным трактом

Рис. 3. Внешний вид элемента антенно-фидерного тракта с повреждением в виде пробоины в широкой стенке волновода

Рис. 4. Внешний вид неповреждённого элемента антенно-фидерного тракта

Простейшее устройство с элементами адаптации состоит из (рис. 5) металлического волновода 1 произвольной конфигурации, покрытого снаружи токопроводящей, эластичной оболочкой 2, обладающей способностью затягивать образующиеся в результате осколочно-пулевого воздействия механические пробоины и тем самым восстанавливать в местах повреждений электродинамические свойства антенно-фидерных трактов [7].

Рис. 5. Вид поперечного сечения предлагаемой конструкции элемента антенно-фидерного тракта: 1 – металлический волновод произвольной конфигурации; 2 – токопроводящая, эластичная оболочка, обладающая способностью затягивать образующиеся в результате осколочно-пулевого воздействия механические пробоины

Форма внешней токопроводящей оболочки 2 выбирается из условия обеспечения наилучшей обтекаемости устройства ударной волны. Достоинством предложенного технического решения является то, что, в отличие от известных, оно решает не только внутреннюю задачу, но и внешнюю, то есть не только поддерживает коэффициент стоячей волны по напряжению на заданном уровне, но и препятствует излучению электромагнитной энергии через пробоины антенно-фидерных трактов в пространство.

Заключение

Теоретические расчёты показали, что комплексное применение предлагаемых устройств [6, 7] может позволить увеличить отношение сигнал – помеха на величину до 10–15 дБ и существенно снизить степень искажения автокорреляционной функции широкополосных сигналов по сравнению с известными антенно-фидерными трактами РТС [1, 4, 8] в условиях осколочно-фугасного воздействия возможного противника. Новизна предлагаемых устройств подтверждается двумя патентами Российской Федерации на изобретения [6, 7].

Список литературы

1. Информационные технологии в радиотехнических системах: учебное пособие / под ред. И.Б. Федорова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2011. 846 с.
2. Справочник по радиолокации / Под ред. М.И. Скольника. Пер. с англ. под. общ. ред. В.С. Вербы. В 2 кн. Кн. 1. М.: Техносфера, 2014. 672 с.
3. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: учебник. 4-е изд., испр. и доп. М.: ЛЕНАНД, 2016. 528 с.
4. Ахияров В.В., Нефедов С.И., Николаев А.И., Служин Г.П., Федоров И.Б., Шустиков В.Ю. Радиолокационные системы: учебное пособие / Под ред. А.И. Николаева. 2-е изд. М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2018. 349 с.
5. Немировский М.С., Локшин Б.А., Аронов Д.А. Основы построения систем спутниковой связи / Под ред. доктора техн. наук, профессора М.С. Немировского. М.: Горячая линия – Телеком, 2016. 432 с.
6. Гурский С.М. Автоматический корректор амплитудно-частотной характеристики // Патент РФ 2248650. Патентообладатель Гурский Сергей Михайлович. 2005. Бюл. № 8.
7. Гурский С.М., Тимофеев Г.С., Гелесев А.И., Гушин А.И., Никишин В.Н., Филиппов О.Г. Гибкий волновод // Патент РФ № 2121735. Патентообладатель Московское высшее училище радиозлектроники ПВО. 1998. Бюл. № 31 (II часть).
8. Пономарев Л.И., Вечтомов В.А., Милосердов А.С. Бортовые цифровые многолучевые антенные решетки для систем спутниковой связи / Под ред. Л.И. Пономарева. М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2018. 197 с.