

УДК 621.391

# МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ В СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЁТКАХ ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ ТОЧЕК ДОСТУПА



[И.С. Шостко](#)

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

*Проведено аналіз залежності між характеристиками випромінювання АР і формою НШСС. Введена корекція параметрів імпульсів, що динамічно змінюється, при формуванні ДС. Розглянуто методи управління просторово-часовими (спектральними) характеристиками ДС НШС АР.*

*The analysis of relationship between radiation characteristics and the shape of the UWB signal. Introduced dynamically changing the correction parameters of pulses. Presents a method of managing spatial and temporal (spectral) characteristics of the UWB antenna.*

*Проведен анализ зависимости между характеристиками излучения АР и формой СШПС. Введена динамически изменяющаяся коррекция параметров импульсов при формировании ДН. Рассмотрены методы управления пространственно-временными (спектральными) характеристиками ДН СШП АР.*

## Введение

Технология связи со сверхширокополосными сигналами (СШПС) появилась в начале 90-х. Пионерами в этой области стали американские ученые Д. Росс, К. Роббинс, Л. Фуллертон. Было установлено, что СШПС достаточно эффективны для передачи цифровой информации. Применение СШПС обеспечивает повышенную скорость передачи, скрытность и надёжность каналов связи. Однако дальность действия радиосвязи с СШПС не может быть большой из-за ограничений по электромагнитной совместимости и проблем изменения формы сигналов в процессе прохождения канала связи. В работах [1, 2], посвящённых применению СШПС, показано, что процессы излучения, приёма и обработки подобных сигналов значительно отличаются от аналогичных процессов, происходящих в узкополосных системах. Основное отличие связано с изменением формы сигнала при его излучении, распространении в пространстве и приёме. Изменённая форма сигнала в приёмнике затрудняет обработку в корреляторе или в согласованном фильтре. В связи с этим необходима коррекция параметров СШПС, что повысит эффективность их передачи. Вместе с тем, свойство изменения формы СШПС можно использовать для управления диаграммой направленности (ДН) передатчика и приёмника.

Создание источников сверхширокополосного излучения с управляемой антенной решёткой (АР) в качестве излучателя является перспективным направлением СШП-радиоэлектроники [3]. К элементу такой решётки предъявляются жесткие, противоречащие друг другу требования. Элемент должен быть компактным, чтобы

расстояние между антенными входами (фазовыми центрами) антенн в решетке не превышало половину пространственной протяженности возбуждающего импульса. Диаграмма направленности (ДН) должна быть однонаправленной, и характеристики излучения должны быть максимально близкими для возможно больших углов отклонения от направления главного максимума в рабочем полупространстве. Кроме того, антенна должна иметь полосу пропускания достаточно большую для эффективного излучения СШПС.

Для повышения эффективности управления ДН АР с применением СШПС, требуется решение ряда задач:

1. Исследовать на математической модели влияние формы одиночного СШПС и их последовательности на ДН АР.
2. Разработать методы коррекции параметров СШПС для различных элементов радиотракта.

## **I. Технологии формирования луча АР**

На сегодняшний день применяются две основные технологии формирования луча в АР, используемые в беспроводных точках доступа с Wi-Fi на основе управления параметрами передатчиков и антенн. Первая – технология формирования луча в передатчике, вторая – технология формирования луча "на антенне".

### **Технология формирования луча «в передатчике»**

При использовании технологии формирования луча «в передатчике» выполняется управление характеристиками каждого передатчика внутри массива передатчиков, пока общий сигнал не будет оптимизирован для достижения нужного приёмника в заданном направлении. Массив, где каждая антенна передаёт сигнал с чуть различающимися характеристиками, называется фазовым массивом (phased array). Технология формирования луча "в передатчике" работает не только путём увеличения общей мощности, что достигается использованием нескольких антенн, но и изменением характеристик сигналов антенн, чтобы в направлении приёмника был послан более мощный "луч", а в других направлениях расходовалось бы меньше энергии. С двумя передающими антеннами можно потратить меньше энергии, и в то же время учетверить мощность передающегося сигнала в направлении луча.

Передатчику/точке доступа требуется принять единственный пакет от клиента, чтобы настроиться на направление передачи сигнала. Анализ множества пакетов в любой момент может показать, насколько оптимально настроены параметры формирования луча. Двухстороннее взаимодействие позволяет увеличить мощность вплоть до 3 дБ. Если клиент перемещается, антенны изменяют свое положение или происходят какие-то события, динамически влияющие на мощность сигналов, система адаптируется практически мгновенно и обеспечивает новую оптимизированную конфигурацию. Фактически, эта технология является опциональной частью стандарта 802.11n. Корпорация Cisco Systems первой представила на рынок данную

технологии формирования луча "на чипе". Точка доступа AIR-LAP1142N корпоративного класса от Cisco Systems является первым и пока единственным продуктом с технологией beamforming, которая названа ClientLink [4].

### Технология формирования луча "на антенне"

Технология формирования луча "на антенне" – технология, разработанная и запатентованная компанией Ruckus Wireless под названием "BeamFlex" [4]. По своей сути BeamFlex использует массив антенн и анализирует каждый пакет, чтобы оценить производительность передачи сигналов. В зависимости от конфигурации точка доступа BeamFlex может настроить массив в любую из тысяч возможных комбинаций ДН. Точка доступа отслеживает соединения в реальном времени и модифицирует лучи "на лету", чтобы они соответствовали динамически изменяющимся условиям. Следуя традициям MRC (maximal ratio combining, суммирование дифференциально взвешенных сигналов каждого канала), антенны усиливают полезные сигналы только в направлении приемника. Это позволяет получить прирост мощности сигнала до 10 дБ по направлению целевого луча, а также подавление помех до -17 дБ на задних лепестках. Подавление помех оказывает ещё более выраженное влияние на производительность, чем усиление целевого луча.

## II. Модели сверхширокополосных сигналов

Для описания СШПС, принято использовать вещественную функцию изменения формы сигнала во времени. В работе выбраны математические модели, в которых форму импульса  $x(t)$  и его спектр  $\Lambda_x(f)$  можно изменять с помощью коррекции формы импульса:

$$x(t) = x_1(t) - x_2(t), \quad \Lambda_x(f) = \Lambda_{x1}(f) - \Lambda_{x2}(f). \quad (1)$$

Для одиночного импульса выбрана модель гауссовой формы [5] с учётом возможности коррекции импульса с помощью масштабных коэффициентов:

$$x(t) = \frac{A}{1 - \alpha(t)} \left( \exp \left( -\pi \left[ \frac{(t - t_0)}{\tau_u} \right]^2 \right) \right) - \alpha(t) \exp \left( -\pi \left[ \frac{\alpha(t)(t - t_0)}{\tau_u} \right]^2 \right), \quad (2)$$

где  $A$  – пиковая амплитуда в момент времени  $t = t_0$ ;  $\alpha(t)$  – масштабирующий коэффициент, который позволяет изменять форму импульса (рис. 1).

Изменяя длительность импульса  $\tau_u$  и его масштабирующий коэффициент, можно управлять центральной частотой импульса и шириной спектра, что позволяет достичь максимума спектрального коэффициента полезного действия или скорректировать спектральную характеристику сигнала в соответствии с решаемой задачей.

Спектральная плотность энергии в импульсе  $W(f) = |\Lambda_x(f)|^2$ . Характерное изменение нормированного спектра плотности энергии для различных значений масштабного коэффициента приведено на рис. 2.

$$W(\xi) = \frac{|\Lambda_x(\xi)|^2}{\left(\frac{A}{\Delta f}\right)^2}, \text{ где } \xi = \frac{f}{\Delta f}. \quad (3)$$

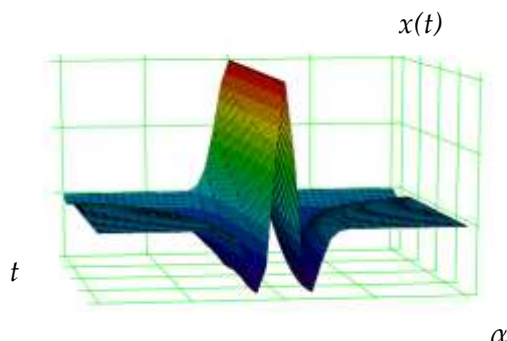


Рис. 1. Форма импульса при изменении  $\alpha$  от 0 до 1

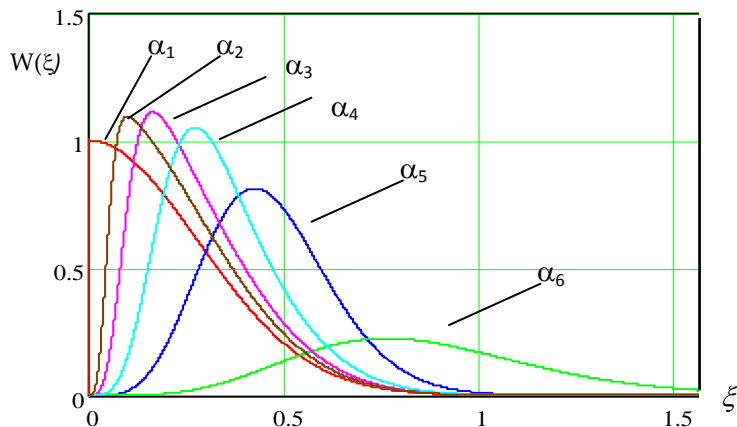


Рис. 2. Нормированный спектр плотности энергии СШПС при  $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 0,08, \alpha_3 = 0,15, \alpha_4 = 0,3, \alpha_5 = 0,6, \alpha_6 = 2$

Для увеличения базы сигнала можно использовать последовательность импульсов:

$$x_p(t, t_0, T_0) = \sum_{g=0}^{K-1} x(t - t_0 - (g - \mu)T_0). \quad (4)$$

База сигнала при этом увеличивается в  $K$  раз, где  $K$  – число импульсов в пачке.

Для управления распределением спектральной плотности энергии СШПС в соответствии с решаемой задачей можно изменять с помощью динамически изменяющихся масштабных коэффициентов форму импульсов, их длительность, период повторения в последовательности.

### III. Методы управления ДН АР при изменении параметров СШПС

Рассмотрена простейшая модель излучателя СШПС в виде линейной антенны (тонкий провод длиной  $L_a, L_a \gg c\tau_u$ , т.е. нестационарный режим ДН). В общем случае, электрическая составляющая электромагнитного поля в дальней зоне для протяженной антенны, возбуждаемой с одного конца током  $i(t)$ , имеет вид:

$$E_{\Sigma}(t, \theta_t, r) = \frac{\sin \theta_t}{4\pi\epsilon_0 r c^2} \int_0^{L_a} \frac{d}{dt} i \left( t - \frac{z}{V_a} - \frac{r - z \cos \theta_t}{c} \right) dz, \quad (5)$$

где  $r$  – расстояние до точки наблюдения;  $\theta_t$  – угол между направлением на точку наблюдения и плоскостью раскрыва,  $V_a$  – скорость распространения электромаг-

нитного поля вдоль антенны;  $c$  – скорость света;  $\frac{r - L_j \cos \theta_t}{c}$  – время прохождения сигнала от  $j$ -го элемента антенны (электрического диполя) до точки наблюдения;  $\frac{L_j}{V_a}$  – запаздывание сигнала в антенне.

Из (5) следует вывод: поле линейной антенны в дальней зоне пропорционально первой производной по времени от тока, возбужденного в диполе. Возбуждающий импульс тока задан в виде модели (2) с единичной амплитудой. Производная этого импульса представляет собой симметричный биполярный импульс (рис. 3). Подставив в (5), получим

$$E_{\Sigma}(t, \theta_t) = \frac{\sin \theta_t}{4\pi\epsilon_0 r c} \frac{1}{(\cos \theta_t - 1)} \frac{1}{(1 - \alpha)} \left[ \exp \left( -\pi \left[ \frac{t - \frac{L_a}{c} - \frac{r - L_a \cos \theta_t}{c}}{\tau_u} \right]^2 \right) - \alpha \exp \left( -\pi \left[ \frac{\alpha \left( t - \frac{L_a}{c} - \frac{r - L_a \cos \theta_t}{c} \right)}{\tau_u} \right]^2 \right) - \exp \left( -\pi \left[ \frac{t - \frac{r}{c}}{\tau_u} \right]^2 \right) + \alpha \exp \left( -\pi \left[ \frac{\alpha \left( t - \frac{r}{c} \right)}{\tau_u} \right]^2 \right) \right]. \quad (6)$$

Из (6) видно, что форма суммарного поля зависит от соотношения между длиной антенны и пространственной длительностью возбуждающего импульса  $c\tau_u$ . Эта форма будет также зависеть от угла наблюдения  $\theta_t$ . Изменение формы импульса поля при изменении угла наблюдения  $\theta_t$  приводит к нестационарности во времени ДН по полю. Поэтому используется пространственная энергетическая ДН  $W_t(\theta_t, \varphi_t)$ , которая получается путем усреднения мощности, излучаемой в каждом угловом направлении, за время пробега импульса тока по антенне и описывает распределение излучаемого потока плотности энергии в пространстве в зависимости от углов  $\theta_t$  и  $\varphi_t$ :

$$W_t(\theta_t, \varphi_t) = \frac{1}{Z_0} \int_{-\infty}^{\infty} E_{\Sigma}^2(t, \theta_t, \varphi_t) dt. \quad (7)$$

Бесконечные пределы интегрирования по времени позволяют использовать это выражение для импульсов тока любой формы и антенн любой длины. При сравнении характеристик антенн применяется нормированная энергетическая ДН:

$$W_{tn}(\theta_t, \varphi_t) = \frac{W_t(\theta_t, \varphi_t)}{W_{t\max}}, \quad (8)$$

где  $W_{t\max} = \frac{1}{Z_0} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} E_{\Sigma}^2(t, \theta_t, \varphi_t) dt \right]_{\max}$ .

Для выбранных моделей СШПС проведен анализ изменения формы  $W_{t_n}(\theta_t, \varphi_t)$  (рис. 4) и нормированного спектра плотности энергии в зависимости от длительности импульса и значения масштабного коэффициента.

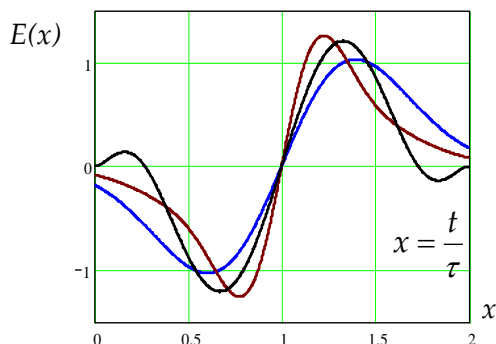


Рис. 3. Форма СШПС для разных значений масштабных коэффициентов

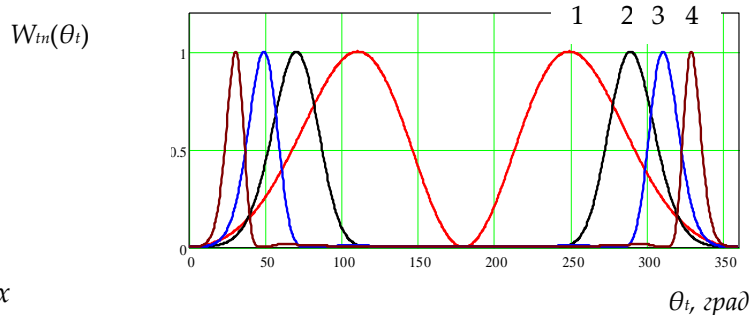


Рис. 4. Одномерные ( $\varphi_t = const$ ) энергетические ДН (антенна с последовательным возбуждением):  
1 – при  $L_a = 5c\tau_u$ , 2 – при  $L_a = 2c\tau_u$ ,  
3 – при  $L_a = c\tau_u$ , 4 – при  $L_a = 0,1c\tau_u$ ,  $\tau_u = 2$  нс,  $\alpha = 0,6$

При увеличении отношения  $L_a/c\tau_u$  максимум ДН отклоняется от нормали. При этом максимальное значение ДН растет, а ее ширина уменьшается. Показано, что направление максимума ДН можно изменять, меняя форму импульса тока (напряжения), возбуждающего передающую антенну [6, 7]. Это свойство может быть использовано для управления ДН антенны, для согласования направлений максимума ДН передающей и приёмной антенн.

Рассмотрены способы формирования луча СШП АР, которая работает на приём и передачу. Особенности формирования диаграммы направленности АР учтены с помощью передаточной функции системы, параметрами которой являются пространственные углы. Принцип управления ДН АР основан на свойствах импульсной формы волны и использует изменения в энергетическом спектре сигнала в зависимости от направления приема. Эти изменения формы волны являются полезной особенностью для автоматического управления лучом. Энергетическая ДН импульсной АР характеризуется узким главным лучом и отсутствием боковых лепестков. Ширина луча по уровню 0,5 энергетической ДН АР определяет угловую разрешающую способность как убывающую функцию эффективной ширины полосы частот.

АР может быть с линейным или круговым расположением излучателей. Пример расчёта нормированного множителя ДН в плоскости АР  $F_c(\theta)$ , состоящей из 8 излучателей, размещённых по кругу радиусом 15 см, спектр сигнала равномерный в полосе от 2 до 3 ГГц, для угла направления главного максимума  $\theta=90; 30$ , показан на рис. 5.

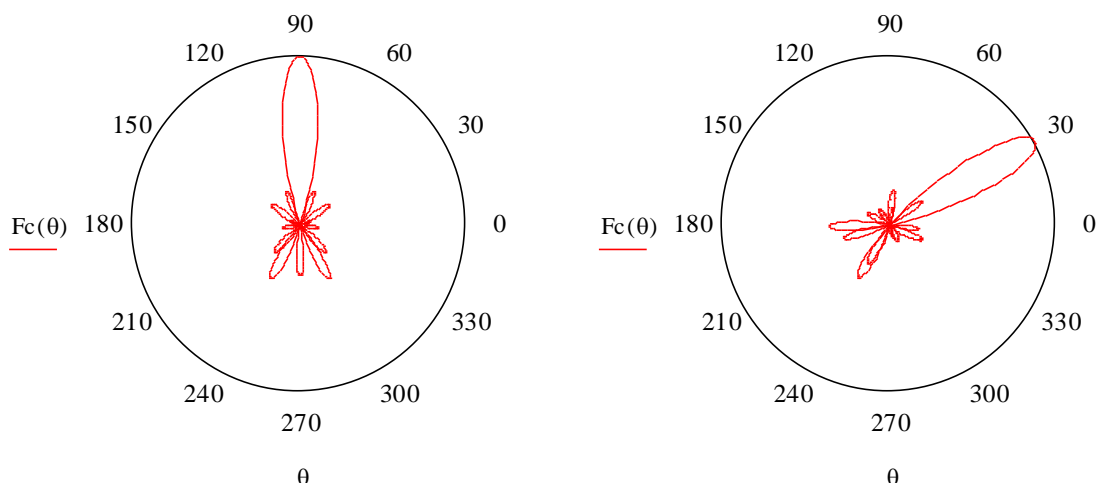


Рис. 5 Формирование диаграммы направленности круговой АР

Для синтеза требуемой формы сигнала на входе антенны радиоприёмного устройства применены спектральные методы анализа формы СШПС. Этот метод предполагает, что для РПУ известна передаточная функция  $H_i(\omega, \theta, \varphi)$  (рис. 6).

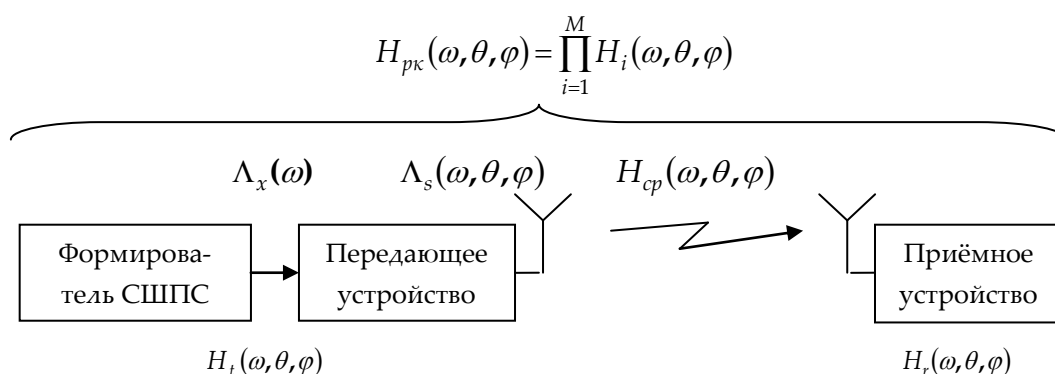


Рис. 6 Передаточная функция радиоканала

При анализе влияния атмосферной трассы СШПС представлен в виде суммы независимых друг от друга гармонических волн. В том случае, когда в среде дисперсия не равна нулю (при длинах волн менее 10 см), преобразование СШПС происходит благодаря интерференции независимых гармонических составляющих, ослабленных атмосферой и приходящих в точку приема с разной фазовой скоростью. Изменение амплитуды разных спектральных составляющих в зависимости от условий прохождения сигнала приводит к расплыванию исходного импульса – его пиковое значение падает, а ширина увеличивается.

В этом случае преимуществом обладают СШПС, частотный диапазон которых разбивается на множество широкополосных поддиапазонов, и применяется технология мультиплексирования сигнала по ортогональным несущим (OFDM). Для каждого частотного поддиапазона задаётся своя несущая частота и сравнительно узкая полоса сигнала, поэтому дисперсией в атмосфере можно пренебречь. Длительность

импульсов в каждом частотном поддиапазоне определяется спектром результирующего сигнала. К примеру, при использовании частотных поддиапазонов шириной 500 МГц длительность импульса должна быть порядка 2 нс.

Исследован процесс влияния коррекции формы СШПС на качественные показатели передатчика. В качестве критериев оценки эффективности применения различных СШПС, в зависимости от решаемой задачи, выбраны минимум ширины энергетической ДН (9), эффективность использования частотного диапазона (10) и локализация во временной области (11):

$$\Phi 1 = \frac{1}{\mathcal{E}_{r \max}} \int_0^{2\pi} \mathcal{E}_r(\theta) d\theta, \quad (9)$$

$$\Phi 2 = \int_{-\infty}^{\infty} f^2 |\Lambda_S(f)|^2 df, \quad (10)$$

$$\Phi 3 = \int_{-\infty}^{\infty} t^2 S(t)^2 dt, \quad (11)$$

где  $\mathcal{E}_r(\theta) = \int_{-\infty}^{\infty} W(f, \theta) df$  – энергия принятого импульса при произвольной ориентации приёмной антенны;  $\mathcal{E}_{r \max}$  – энергия принятого импульса при соосном расположении передающей и приёмной антенн;  $\Lambda_S(f)$ ,  $S(t)$  – амплитудный спектр и форма СШПС.

Эффективность системы по каждому из критериев можно улучшить (таблица), внося коррекции в форму сигнала передатчика. Объектом управления в цепи формирования сигнала является длительность импульса и масштабные коэффициенты. Можно всегда изменить коэффициент  $\alpha$  так, чтобы получить максимальный выигрыш по заданному критерию.

Таблица. Эффективность применения СШПС при изменении масштабного коэффициента

Сигнал	Критерий		
	Φ1	Φ2	Φ3
$\alpha=0$	100	3,79	100
$\alpha=0,6$	67,701	15,553	96,346
$\alpha=0,9$	56,272	27,772	99,591
$\alpha=1,1$	50,906	98,526	99,666
$\alpha=1,5$	43,133	60,651	95,275
$\alpha=2$	36,407	37,52	82,407



## Выводы

В процессе решения поставленной задачи получены следующие научные и практические результаты:

1. Учтены особенности формирования одиночных или последовательности импульсов в передатчике. Введена динамически изменяющаяся коррекция параметров импульсов при формировании СШПС. Изменяя длительность импульса тока (напряжения) и его форму, можно скорректировать спектральную характеристику импульса, возбуждающего антенну, в соответствии с решаемой задачей.

2. Получены зависимости качественных показателей эффективности передатчика от изменения формы СШПС. В качестве критериев оценки эффективности выбраны минимум ширины энергетической ДН, эффективность использования частотного диапазона и локализация во временной области. Показано, что эффективность системы по каждому из критериев можно улучшить, внося коррекции в форму сигнала передатчика. Объектом управления в цепи формирования сигнала является длительность импульса и масштабные коэффициенты.

3. Показано, что форма излученного СШПС зависит от импульсной характеристики антенны и от соотношения размеров пространственной протяжённости сигнала и антенны. Импульсная характеристика зависит от типа антенны, ее формы и геометрических размеров, координат точки возбуждения антенны, свойств окружающей среды, от эффективности согласования с генератором (фидером) и свободным пространством в полосе частот сигнала. В зависимости от соотношения размеров пространственной протяжённости сигнала и антенны, при  $c\tau_u \gg L_a$ , форма излучаемого поля во времени повторяет форму производной напряжения (тока), возбуждающего антенну. При  $c\tau_u < L_a$  антенны излучают в разных направлениях сигналы, имеющие различный профиль. Излучает центр (точка возбуждения антенны) и края апертуры (диполя), в результате образуется несколько сигналов. Форма СШПС во времени повторяет форму напряжения (тока). Суммарная амплитуда излучаемого поля изменяется в зависимости от угла наблюдения и от времени. Форма сигнала в дальней зоне антенны зависит от угловых координат точки наблюдения, времени и исходной формы напряжения (тока). Изменяя параметры импульса ударного возбуждения антенны, можно управлять энергетической ДН и спектром СШПС. В направлении максимума энергетической диаграммы направленности форма излучаемого поля во времени повторяет форму производной сигнала (тока). Чтобы в направлении максимума диаграммы направленности в дальней зоне получить сигнал требуемого вида, например  $f(t)$ , следует возбуждать диполь током, пропорциональным  $k(t)f(t)dt$ , где функция  $k(t)$  компенсирует искажения сигнала, вносимые импульсной характеристикой радиочастотного тракта.

4. Установлено, что в приёмном устройстве форма принятого импульса будет изменяться в зависимости от взаимной ориентации передающей и приёмной антенн. Направление максимума ДН передающей антенны можно изменять, меняя форму импульса тока (напряжения), возбуждающего передающую антенну. Это свойство

может быть использовано для управления ДН антенны, для согласования направления максимума ДН передающей антенны в направлении приёмной антенны.

5. Показано, что ДН АР, можно описать с помощью передаточной функции системы, параметрами которой являются пространственные углы. С учетом особенностей прохождения сигналом радиочастотного тракта внесены изменения в математическую модель активной импульсной СШП АР с системой формирования луча. Предложен метод управления ДН АР. Управление ДН осуществляется изменением масштабного коэффициента и длительности СШПС. Принцип измерения угла расогласования максимумов ДН АР основан на свойствах импульсной формы волны и использует изменения в энергетическом спектре принятого сигнала в зависимости от направления приема. Эти изменения формы волны являются полезной особенностью для автоматического управления лучом. Энергетическая ДН СШП АР характеризуется узким главным лучом и отсутствием боковых лепестков. Ширина луча по уровню 0,5 энергетической ДН АР определяет угловую разрешающую способность как убывающую функцию эффективной ширины полосы частот.

6. Установлено, что выбирая диапазон рабочих частот и ограничивая ширину спектра СШПС или разбивая сигнал по спектру на несколько составляющих, можно выбрать параметры, при которых дисперсией в атмосфере можно пренебречь. В диапазоне частот от 1 ГГц до 10 ГГц затухание спектральных составляющих сигнала и их отставание по фазе возрастает с увеличением частоты линейно.

### Список литературы:

1. Иммогеев И.Я., Синявин А.Н. Излучение сверхширокополосных сигналов // Антенны: – М.: Радиотехника, 2001. – Вып. 1(47). – С. 8-16.
2. Астанин Л.Ю., Костылев А.А. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений. – М.: Радио и связь, 1989. – 192с.
3. Вопросы перспективной радиолокации. Коллективная монография / Под ред. А.В. Соколова. – М.: Радиотехника, 2003. – 512 с.
4. Технология формирования луча (beamforming): новые возможности WiFi [Электронный ресурс] / – Электрон. дан. — М.: Russian Tom's Hardware Guide, 2009. — Режим доступа к журн.: [http://www.thg.ru/network/ruckus\\_zoneflex\\_7962/onepage.html](http://www.thg.ru/network/ruckus_zoneflex_7962/onepage.html).
5. Malek G.M. Hussain Antenna patterns of no sinusoidal waves with the time variation of a Gaussian pulse – Part I // IEEE Trans. Electromagn. Compat., – 1988. – Vol. EMC-30, No.4. – P. 504-512.
6. Шостко И.С., Таха Алмакадма Анализ зависимости между характеристиками излучения и конструктивными особенностями передающей антенны при работе с СШП сигналами // Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – 2009. – Вып. 159. – С. 196–202.
7. Шостко И.С., Таха Алмакадма Особенности формирования диаграммы направленности антенной решётки при приёме СШП сигнала и факторы, влияющие на изменение её формы // Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – 2009. – Вып. 159. – С.152–157.