

Бельчиков Анатолий Владимирович,
 доктор технических наук
 Мишустин Борис Александрович
 кандидат технических наук
 Дзисяк Андрей Богданович
 кандидат технических наук
 Зайцев Василий Кузьмич
 ЗАО ПФ «ЭЛВИРА», г. Железнодорожный
 E-mail: elv@elvira.ru

Взгляд разработчиков нелинейных локаторов серии «ЛОРНЕТ» на некоторые актуальные вопросы нелинейной локации

Аннотация: В статье рассмотрены актуальные вопросы нелинейной радиолокации. Дан вывод выражений для НЭПР n-ой гармоники нелинейного объекта. Приведены результаты экспериментальных исследований оптимальных методов построения НЛ.

Ключевые слова: нелинейная локация, эффективная площадь рассеяния, нелинейная цель, зондирующий сигнал, нелинейный локатор

По аналогии с линейной локацией, где используется параметр эффективная площадь рассеяния (ЭПР), в нелинейной локации вводится параметр нелинейная эффективная площадь рассеяния (НЭПР).

Классическое определение ЭПР:

$$P_2 = \sigma \cdot P_1,$$

где σ - ЭПР [м²];

P_2 - мощность сигнала, отражённого целью;

P_1 - плотность потока мощности сигнала, падающего на цель.

Плотность потока мощности, отражённой от цели в точке приёма этого сигнала, равна:

$$P_2 = \frac{P_2}{4\pi R^2}, \text{ следовательно } P_2 = P_2 \cdot 4\pi R^2$$

$$\Rightarrow \sigma = 4\pi R^2 \frac{P_2}{P_1} \quad (1),$$

где R – расстояние до нелинейного объекта (НО);

P_2 - плотность потока мощности, отражённой от цели в точке приёма этого сигнала.

В нелинейной локации обычно исследуют 2-ю и 3-ю гармоники, рождённые нелинейным объектом. В зависимости от того, какой продукт преобразования рассматривается, вводят параметр НЭПР по 2-й и 3-й гармонике нелинейного элемента при воздействии на него монохроматическим зондирующим сигналом. Следовательно:

$$\sigma_2 = 4\pi R^2 \frac{P_{2й гармоник}}{P_1}, \quad \sigma_3 = 4\pi R^2 \frac{P_{3й гармоник}}{P_1},$$

где σ_2, σ_3 - НЭПР по 2-й и 3-й гармоникам в точке приёма этих сигналов;

P_1 - плотность потока мощности сигнала, падающего на нелинейный объект (НО);

$P_{2й гармоник}$ – плотность потока мощности сигнала 2-й гармоники в точке приёма;

$P_{3й гармоник}$ – плотность потока мощности сигнала 3-й гармоники в точке приёма.

По аналогии можно записать:
$$\sigma_n = 4\pi R^2 \frac{P_{nй гармоник}}{P_1} \quad (2)$$

Практически во всех работах, посвящённых нелинейной локации, предполагается, что мощность рождённых 2-й и 3-й гармоник, а значит и НЭПР различных нелинейных объектов резко

уменьшаются с увеличением частоты зондирования выше 1 ГГц. Данное утверждение характерно для работ профессора Вернигорова Н. С. [1], профессора Щербакова Г.Н. [2] и др.

Однако, многолетний практический опыт признанных в мире разработчиков нелинейных локаторов (НЛ) серии «Лорнет» (www.elvira.ru), говорит о том, что данное предположение не выполняется для большинства нелинейных объектов (если не учитывать потери сигнала в среде его распространения и среде укрывания нелинейного объекта). Покажем это.

Для начала выведем формулу для НЭПР по n-й гармонике (σ_n), исходя из её классического определения. При воздействии на нелинейный объект (НО) монохроматическим зондирующим сигналом часть мощности отражается от НО, часть мощности поглощается НО и преобразуется в тепло, другая часть мощности преобразуется в энергию гармоник, кратных частоте зондирования (за счёт нелинейных свойств объекта) с их последующим излучением. Поток мощности в точке его воздействия на нелинейный объект можно записать:

$$P_{zc} = \frac{P_{zc} \cdot G_{A \text{ прд } zc}}{4\pi R^2};$$

где $G_{A \text{ прд } zc}$ – коэффициент усиления антенны передатчика зондирующего сигнала,
 P_{zc} – мощность зондирующего сигнала.

Следовательно, мощность n-й гармоники будет равна:

$$P_n = P_{zc} \cdot \sigma_{\text{погл}} \cdot \xi_n(P_{zc}, \lambda_{zc}),$$

где $\sigma_{\text{погл}}$ – эффективная площадь поглощения зондирующего сигнала нелинейным объектом;
 ξ_n – безразмерный коэффициент эффективности преобразования мощности зондирующего сигнала в мощность n-й гармоники.

По определению (2): $\sigma_n = 4\pi R^2 \frac{P_n}{P_{zc}}$;

где P_n – плотность потока мощности n-й гармоники в точке её приёма.

P_n определяется как:

$$P_n = \frac{P_n \cdot G_{A \text{ нон } n}}{4\pi R^2},$$

где $G_{A \text{ нон } n}$ – коэффициент усиления излучающих элементов «антенны» НО по n-й гармонике.

Следовательно, НЭПР НО по n-й гармонике σ_n определяется как

$$\sigma_n = \frac{P_{zc} \cdot \sigma_{\text{погл}} \cdot \xi_n(P_{zc}, \lambda_{zc})}{4\pi R^2} \cdot \frac{4\pi R^2}{P_{zc}} \cdot G_{A \text{ нон } n};$$

$$\sigma_n = \sigma_{\text{погл}} \cdot \xi_n(P_{zc}, \lambda_{zc}) \cdot G_{A \text{ нон } n};$$

где для $\sigma_{\text{погл}}$ (по аналогии с эффективной площадью поглощения антенны) можно записать

$$\sigma_{\text{погл}} = \frac{\lambda_{zc}^2}{4\pi} \cdot G_{A \text{ нон } zc}, \text{ ТОГДА}$$

(где $G_{A \text{ нон } zc}$ – коэффициент усиления «антенны» нелинейного объекта зондирующего сигнала,
 λ_{zc} – длина волны зондирующего сигнала)

$$\sigma_n = \frac{\lambda_{zc}^2}{4\pi} \cdot G_{A \text{ нон } zc} \cdot \xi(P_{zc}, \lambda_{zc}) \cdot G_{A \text{ нон } n} \quad (3)$$

σ_n – нелинейная эффективная площадь рассеяния нелинейного объекта по n-й гармонике.

Теоретически σ_n вычислить невозможно, так как невозможно вычислить значения величин $G_{A \text{ но } z_c}, \xi(P_{z_c}, \lambda_{z_c}), G_{A \text{ но } n}$. Но σ_n легко можно определить экспериментальным путём.

Формула (3) полностью совпадает с формулой, выведенной в статье Вернигорова Н.С. [3]. В той же статье автор теоретически выводит формулу для коэффициента преобразования зондирующего сигнала $\xi_n(P_{z_c}, \lambda_{z_c})$ в энергию гармоник для диода 2А605Б. Далее, пользуясь этой формулой, автор приводит график зависимости коэффициента преобразования зондирующего сигнала $\xi_n(P_{z_c}, \lambda_{z_c})$ от частоты. Из графика следует, что $\xi_n(P_{z_c}, \lambda_{z_c})$ резко уменьшается для частот зондирования выше 1 ГГц, даже без учёта затухания радиоволн в среде распространения и среде укрывания нелинейного объекта.

Однако, практические опыты показывают, что максимальное расстояние обнаружения диода 2А605Б увеличивается с ростом значения частоты зондирования. Так, в ЗАО ПФ «ЭЛВИРА» (www.elvira.ru) проводился ряд опытов по обнаружению диода 2А605Б (диод использовался в заводском конструктивном исполнении) с помощью трёх НЛ с различными частотами зондирования. В результате проведённого опыта зафиксировано максимальное расстояние обнаружения (R) диода 2А605Б:

НЛ «Лорнет-09» (частота зондирования 900 МГц) - расстояние обнаружения R - 1-3 см – неуверенно;

НЛ «Лорнет-24» (частота зондирования 2400 МГц) - расстояние обнаружения R – 8-12 см, уверенно;

НЛ «Лорнет-36» (частота зондирования 3600 МГц) - расстояние обнаружения R - более 60 - 100 см, уверенно.

Таким образом, полученные практические результаты противоречат теоретическим выводам профессора Вернигорова Н. С. о том, что нелинейные локаторы эффективны лишь при значении зондирующих частот ниже 1 ГГц или чуть выше [3].

Ряд авторов, занимающихся нелинейной локацией, определяют НЭПР, рассматривая частный случай подключения диода к биконическому вибратору, например, в статье [4]. Формулы, выведенные авторами статьи, показывают, что НЭПР различных ПП диодов в основном зависит от их частотных свойств и практически падает до нуля на частотах зондирования выше 2,5 ГГц. На наш взгляд при выводе формул авторы берут абстрактные параметры диода и допускают ряд ошибок. Так, обратный ток диода полагается равным 1мкА, а r базы 40 Ом. Следовательно, при токе через диод 0,5А падение напряжения составит 20 вольт, чего реально не бывает (на кремниевых диодах, обычно 0,7-1 вольт). Если подставить падение напряжения примерно на 1 вольт в формулу, которую авторы приводят в статье [4]: $i_{(u(t))} = i_0 (e^{\lambda \cdot u(t)} - 1)$ (λ – величина, обратная температурному потенциалу $\phi_t = 26\text{мВ}$), то при обратном токе $i_0 = 1\text{мкА}$ получим ток, протекающий через диод примерно равным 233000000000 ампер. Конечно, такой ток через диод не может протекать. Поэтому в реальных диодах не бывает обратных токов 1мкА, а также не бывает объёмных сопротивлений базы 40 Ом.

Для исследования зависимости НЭПР НО от значения частоты зондирования, в ЗАО ПФ «ЭЛВИРА» (www.elvira.ru) был изготовлен биконический вибратор с размерами, которые приводятся в статье [4], и к нему был подключён диод 2А605Б. Результаты обнаружения 2А605Б с подключённым биконическим вибратором тремя НЛ приведены ниже:

НЛ «Лорнет-09» (частота зондирования 900 МГц) - расстояние обнаружения 8м, очень уверенно. Горит 5 светодиодов. Мощность импульсная - 10 ватт.

НЛ «Лорнет-24» (частота зондирования 2,4 ГГц) - расстояние обнаружения 6 м, уверенно.

НЛ «Лорнет-36» (частота зондирования 3,6 ГГц) - расстояние обнаружения более 9 м, уверенно. Горит 5 светодиодов. Мощность импульсная – 2,5 ватт.

Таким образом, практические измерения максимального расстояния обнаружения НО (биконического вибратора с линейными размерами 21см, 2 плеча биконического вибратора по 10 см и диод 1 см) опровергают выводы авторов о том, что зондирующие частоты эффективны лишь до значений ниже 2,5 ГГц.

Кроме того, в ЗАО ПФ «ЭЛВИРА» был проведен эксперимент, который показывает зависимость НЭПР НО по 2-й гармонике от частоты зондирующего сигнала.

Эксперимент проводился следующим образом. Были изготовлены наборы высококачественных фильтров. Один фильтр ФНЧ, который подавлял в зондирующем сигнале все гармоники, кроме 1-й, и фильтры на приём 2-й гармоники. Блок-схема установки выглядит следующим образом (Рис.1).

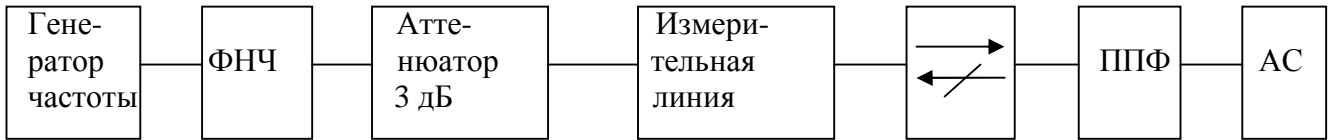


Рис.1. Блок-схема экспериментальной установки

Измерительная линия представляла собой широкополосную линию передачи, работающую в диапазоне частот от 100 МГц до 15 ГГц, имеющую зазор, в который помещался объект исследований (нелинейный элемент). В зазоре существует электромагнитное поле, которое воздействует на НЭ и порождает высшие гармоники. С помощью синтезатора частот изменялась частота и уровень зондирующего сигнала. Анализатор спектра контролировал уровень сигнала в любой точке блок-схемы. На входе анализатора спектра включён полосно-пропускающий фильтр 2-й гармоники.

Помещая в зазор различные электронные компоненты (НО), определялись уровни сигналов 2-й гармоники.

Результаты эксперимента сведены в следующую таблицу.

Таблица 1. Результаты практического измерения уровня второй гармоники нелинейных объектов при уровне зондирующего сигнала +10 дБм

Объект\ Fзс	960 МГц	3600 МГц	7200 МГц	10400 МГц
КТ315	-114 дБм	-81 дБм	-83 дБм	-108 дБм
Сим-карта (две разных)	-90/-88 дБм	-68/-74 дБм	-78/88 дБм	-105 /шумы -118 дБм (не определяется)
Светодиод	-105 дБм	-88 дБм	-88 дБм	-103 дБм
КД522	-82 дБм	-69 дБм	-65 дБм	-96 дБм
Процессор MSP430F149	-108 дБм	-85 дБм	-90 дБм	-97 дБм
2А606 диод	-65 дБм	-60 дБм	-53 дБм	-55 дБм

Эксперимент показал, что НЭПР (σ_2) НО зависит от частоты зондирующего сигнала и, конечно, от самого НО, его размеров или размеров, входящих в его состав р-п элементов. Эксперимент также показал, что мощность порождённого сигнала 2-й гармоники, в меньшей степени зависит от частотных свойств полупроводников, входящих в состав объекта, нежели от соотношения размеров исследуемого объекта и длины волны зондирующего сигнала. Причём зондирующий сигнал порождает высшие гармоники тем большей интенсивности, чем ближе длина волны зондирующего сигнала соответствует линейным размерам НО.

Изменяя частоту и уровень зондирующего сигнала, можно определять зависимости НЭПР различных нелинейных объектов от этих величин. Эксперимент показал, что НЭПР (σ_2) НО растёт с увеличением частоты примерно до 6-7 ГГц, затем рост НЭПР σ_2 замедляется, переходит в плато и чуть падает для частот зондирования примерно 10 ГГц.

Вывод: на сегодняшний день для нелинейных локаторов наиболее предпочтительными являются частоты зондирования 3-7 ГГц. И лишь при работе нелинейных локаторов с НО, которые

могут укрываться в средах, в которых велико затухание зондирующего сигнала, необходимо снижать частоту зондирования. Для решения проблем, изложенных выше, в ЗАО ПФ «ЭЛВИ-РА» разработан первый в мире НЛ в моноблочном исполнении, в котором возможно использование 2-х частот зондирования: 800 МГц и 3600 МГц. В локаторе сигнал зондирования излучается либо на нижней, либо на верхней, либо поочередно на нижней и верхней частотах.

Одним из основных параметров НЛ является его обнаружительная способность, то есть расстояние R , на котором НЛ уверенно обнаруживает различные объекты, имеющие в своём составе нелинейные элементы. Определение этого расстояния R и определение параметров, влияющих на R , является на сегодняшний день актуальной задачей. Следует заметить, что в ряде статей при выводе уравнения, связывающего расстояние R с параметром НЭПР, вводится нормированная величина НЭПР с размерностью $[M^{2n} \cdot Вт^{n-1}]$, где N - номер гармоники. Так, в работе [5] авторами приводится формула:

$$\sigma_{H(1)} \approx \frac{(4\pi)^{n+1} P_u r^{2n+2}}{P_u^n G_u^n A_n}, [M^{2n} Bm^{1-n}]$$

где n - номер гармоники;

P_u - излучаемая мощность (непрерывная или в импульсе), Вт;

G_u - КНД передающей антенны на частоте излучаемого сигнала;

A_n - эффективная площадь приёмной антенны на частоте n -й гармоники, m^2 ;

r - расстояние до объекта, м;

P_{np} - мощность принимаемого сигнала, Вт.

Из этой формулы следует, что R_{max}

$$R_{max} = \sqrt{\frac{2n+2}{(4\pi)^{n+1} \cdot P_{np \min}}} \sqrt{\frac{P_u^n \cdot G_u^n \cdot \sigma_{H(1)} \cdot A_n}{}}$$

Там же приводится размерность $\sigma_{H(1)} [M^{2n} \cdot Bm^{1-n}]$, где n - номер гармоники,

тогда при

$$n = 1 \quad \sigma_{H(1)} [M^2 \cdot Bm^0] \quad [M^2]$$

$$n = 2 \quad \sigma_{H(1)} [M^4 / Bm] \quad \left[\frac{M^4}{Bm} \right]$$

$$n = 3 \quad \sigma_{H(1)} [M^6 / Bm^2] \quad \left[\frac{M^6}{Bm^2} \right] \text{ и т.д.}$$

Такая размерность, пусть и для нормированной величины $\sigma_{H(1)}$, на наш взгляд, вводит в заблуждение. Не ясен смысл сложной размерности для величины НЭПР. Кроме того, непонятно, почему излучаемая мощность и КНД передающей антенны стоят в степени n ?

Проще и более правильно, на наш взгляд, использовать классическую размерность для НЭПР - σ_n - $[m^2]$, тогда задача определения максимальной дальности обнаружения нелинейной цели будет сводиться к определению зависимости σ_n для каждой гармоники от величины потока мощности зондирующего сигнала и частоты. И не будет путаницы со степенями и размерностями $\sigma_{H(1)}$ для гармоник. Вычисление величины σ_n с помощью приведённых выше формул – достаточно абстрактная и сложная задача.

Расстояние R определим следующим образом:

$$P_2 = \sigma_2 \cdot P_{3c},$$

где P_2 - мощность второй гармоники;

σ_2 - НЭПР по второй гармонике;

P_{3c} – плотность потока мощности, падающей на нелинейный объект.

P_2 в точке приёма равна $P_{2,r,\beta} = P_2 \cdot e^{-\beta(f)r}$.

Плотность потока мощности P_2 в точке приёма равна

$$P_2 = \frac{P_2 \cdot e^{-\beta(f) \cdot r}}{4\pi r^2} \Bigg/ r = R = \frac{P_2 \cdot e^{-\beta(f) \cdot R}}{4\pi R^2}.$$

Мощность на входе приёмника равна

$$P_{2np} = P_2 \cdot S_e = \frac{P_2 \cdot e^{-\beta(f) \cdot R}}{4\pi R^2} \cdot \frac{\lambda_2^2 \cdot D}{4\pi}$$

Если коэффициент затухания $-\beta(f)$ положить ≈ 0 , то

$$P_{2np} = \frac{P_2}{4\pi R^2} \cdot \frac{\lambda_2^2 \cdot D}{4\pi};$$

где $P_2 = \sigma_2 \cdot \frac{P_{зс} \cdot D_{прд}}{4\pi R^2}$; следовательно:

$$P_{2np} = \frac{\sigma_2 \cdot P_{зс} \cdot D_{прд}}{4\pi R^2} \cdot \frac{D_{прм} \cdot \lambda_2^2}{4\pi R^2 \cdot 4\pi};$$

откуда находим R

$$R \leq \sqrt[4]{\frac{P_{зс} \cdot D_{прд} \cdot \sigma_2 \cdot D_{прм} \cdot \lambda_2^2}{(4\pi)^2 \cdot P_{2прм} \cdot 4\pi}} = \sqrt[4]{\frac{\sigma_2 \cdot \lambda_2^2}{(4\pi)^3} \cdot \frac{P_{зс}}{P_{2прм}} \cdot D_{прд} \cdot D_{прм}}$$

Обычно $D_{Азс}$ и $D_{Апрм}$ обозначаются G от английского слова «gain»

$$D_{Азс} = G_{Азс}$$

$$D_{Апрм} = G_{Апрм}; \text{ и тогда}$$

$$R \leq \sqrt[4]{\frac{\sigma_2 \cdot \lambda_2^2}{(4\pi)^3} \cdot \frac{P_{зс}}{P_{2прм}} \cdot G_{Азс} \cdot G_{Апрм}}.$$

Для формулы НЛ, работающего на n гармонике,

$$R \leq \sqrt[4]{\frac{\sigma_n \cdot \left(\lambda_{зс}/n\right)^2}{(4\pi)^3} \cdot \frac{P_{зс}}{P_{2прм}} \cdot G_{Азс} \cdot G_{Апрм n}}, \quad (4)$$

где n – номер гармоники.

Здесь всего один параметр σ_n - неизвестен. Но он может быть достаточно просто определён экспериментальным путём. В формуле (4) есть все величины, которые определяют эффективность нелинейного локатора.

Искусство разработки современных НЛ сводится, таким образом, к оптимизации параметров, входящих в формулу (4). Как следует из выражения (4), невозможно в одной модели НЛ достичь оптимальных характеристик. Для того чтобы удовлетворить противоречивые требования, предъявляемые к НЛ, фирма «ЭЛВИРА» разработала и выпускает линейку НЛ с параметрами, приведёнными в табл. 2:

Таблица 2. *Параметры нелинейных локаторов, разработанных фирмой «ЭЛВИРА» (www.elvira.ru)*

Название изделия	Частота передатчика, МГц	Мощность передатчика максимальная, (импульсный/непрерывный), Вт	Частоты приёма, МГц (n – номер гармоники)	Чувствительность приёмников, дБм	Примечание
Лорнет-09	890-891	10/1,3	1780-1782 (2) 2670-2673 (3)	-110	
Лорнет-24	2406-2414	10/1,3	4812-4828 (2) 7218-7242 (3)	-110	
Лорнет-36	3581,5-3607,5	20/1,3	7163-7215 (2) 10744,5-10822,5 (3)	-110	Огибающая прослушивается в импульсном режиме
Триада	890-891 1575 2406...2414	0,15/0,15	1780-1782 (2) 3150 (2) 4812-4828 (2)	-105	3-х частотный лока-тор
Лорнет-60	6140...6200	10/1,3	12280-12400 (2) 18420-18600 (3)	-120	Непрерывный
Лорнет-07-40	700-2100 2700-4100	1 (два передатчика по 0,5 Вт, непрерывный)	4800 Прием сигнала на суммарной частоте от 2-х передатчиков	-120	Приём суммы частот от 2-х передатчиков
Лорнет-836	800 3600	45/ - 20/ -	1600 (2) 2400 (3) 7200 (2) 10800 (3)	-120	2-х частотный

В работе [6] приводится формула Релея для отражённой мощности от объектов, линейные размеры которых малы по сравнению с длиной волны. Мощность отражённого сигнала равна

$$P_{\text{отр}} = k \frac{l^6}{\lambda^4},$$

где l - максимальный размер одной из сторон объекта;

k - коэффициент, имеющий размерность Вт/м².

Можно показать, что величина НЭПР σ_2 также пропорциональна шестой степени линейного размера НО, и обратно пропорциональна четвертой степени длины волны зондирующего сигнала. Данное утверждение будет справедливо для НО, представляющих собой печатные платы с диэлектрической подложкой толщиной 1-2 мм, на которой смонтированы различные полупроводники высотой 5-10-15 мм.

Зондирующий сигнал мощности P_1 создаёт в точке расположения нелинейного объекта напряжённость электрического поля:

$$E = \sqrt{\frac{30 P_1 G}{R^2}} \left[\frac{\text{В}}{\text{м}} \right],$$

где G – коэффициент направленного действия передающей антенны;

R – расстояние от передающей антенны до нелинейного объекта.

Такая напряжённость электрического поля вызывает на нелинейном элементе (нелинейных элементах) ЭДС

$$V_l = hE[V] = \frac{h}{R} \sqrt{30P_1 G [B]},$$

где h – действующая высота «антенны» НО.

Положим действующую высоту «антенны» равной максимальному размеру нелинейного объекта. Внутреннюю проводимость y_{in} источника ЭДС можно рассчитать через ёмкость C объекта в свободном пространстве. Положим C равной ёмкости шара радиуса $h/2$.

$$C = 2\pi\epsilon_0 h = \frac{2\pi}{36\pi 10^9} h = \frac{10^{-9}}{18} h [Ф].$$

$$\text{Отсюда } |y_{in}| = 2\pi f_1 C = \frac{10^{-9}\pi}{9} f_1 h \left[\frac{1}{\Omega M} \right],$$

где f_1 – частота зондирующего сигнала.

Ток на этой частоте в нелинейном элементе

$$I_l = V_l |Y_{in}| = \frac{\pi 10^{-9}}{9R} f_1 h^2 \sqrt{30P_1 G [a]}.$$

Положим ток второй гармоники в 5 раз меньше:

$$I_2 = \frac{\pi 10^{-9}}{45R} f_1 h^2 \sqrt{30P_1 G [a]}.$$

Ток I_2 на частоте второй гармоники создаёт излучение мощностью P_2 в соответствии с сопротивлением излучения $R_{\Sigma 2}$, которое определяется действующей высотой h и длиной волны λ_2 второй гармоники:

$$P_2 = I_2^2 R_{\Sigma 2} = I_2^2 \frac{30\pi^2 h^2}{\lambda_2^2} [Вт]$$

Или

$$P_2 = \frac{32\pi^4 h^6 f_1^2}{27\lambda^2 R^2} P_1 G 10^{-18} [Вт].$$

Так как $\lambda_2 = c/f_2 = 0.5c/f_1 = 150 \cdot 10^6 / f_1 [M]$,

то

$$P_2 = \frac{128\pi^4 h^6 f_1^4}{243R^2} P_1 G 10^{-34} [Вт].$$

Учитывая, что

$$\Pi_1 = \frac{P_1}{4\pi R^2} \left[\frac{Вт}{M^2} \right],$$

получается

$$\text{НЭПР } (\sigma_2) = P_2 / \Pi_1 = \frac{512\pi^5 h^6 f_1^4}{243} G 10^{-34} [M^2] \quad (5)$$

$$\text{НЭПР } (\sigma_2) = 2.1 * \pi^5 * h^6 * f_1^4 * G * 10^{-34} [M^2]$$

Таким образом, НЭПР большинства нелинейных объектов, представляющих интерес для нелинейной локации, соответствует формуле Релея и растёт пропорционально частоте зондирования в четвёртой степени (обратно пропорциональна четвёртой степени длины волны зондирующего сигнала) и максимального линейного размера нелинейного объекта в шестой степени. То есть мы показали, что с увеличением частоты зондирования, например в 2 раза, НЭПР нелинейного объекта возрастёт в 16 раз при фиксированном значении линейного размера НО. Формула (5) подтверждается результатами практических экспериментов, которые проводились в ЗАО «ЭЛВИРА». При выводе формулы (5) не учитывались потери сигнала в среде распространения и среде укрывания нелинейного элемента.

Литература

1. Вернигоров Н.С., Кузнецов Т.В. К вопросу о принципе сравнения в нелинейной радиолокации // ИНФОРМОСТ «Радиоэлектроника и телекоммуникации». – 2002. - №3(21). – С. 8-14.
2. Щербаков Г. Н. Обнаружение скрытых объектов для гуманитарного разминирования, криминалистики, археологии, строительства и борьбы с терроризмом. – М.: Арбат-Информ, 2004. – 144 с.
3. Вернигоров Н.С. Экспериментальные исследования свойств электрических нелинейных объектов // ИНФОРМОСТ «Радиоэлектроника и телекоммуникации». – 2005. - № 6 (42). – С.30-35.
4. Щербаков Г.Н., Николаев А.В., Прохоркин А.Г., Усманов Р.И., Шлыков Ю.А. Исследование рассеивающих свойств нелинейного биконического отражателя – физической модели боеприпаса с электронными устройствами // Спецтехника и связь. – 2011. - № 1.
5. Анцелевич М., Щербаков Г. Обнаружение взрывных устройств с помощью портативных НРЛС // Журнал депонированных рукописей. – 2002. - №5.
6. Маковецкий П.В., Васильев В.Г. Отражение радиолокационных сигналов: Лекции. – Ленинград: ЛИАП, 1975. – 50 с.
7. Добровский И.А. Антенны. – М.: Гос. изд-во по вопросам связи и радио, 1951. – 346 с.