

К ВОПРОСУ О ПРИНЦИПЕ СРАВНЕНИЯ В НЕЛИНЕЙНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

Вернигоров Н.С.,

доктор технических наук, профессор,
академик Петровской АН,

лауреат премии Совмина СССР

Кузнецов Т.В., ведущий инженер.

Появившееся на отечественном рынке большое количество различных моделей нелинейных локаторов отечественного производства означает для потребителя широкий выбор по параметру цена/качество. Однако факт этот имеет и негативную сторону. В условиях жесткой конкуренции некоторые представители фирм начали печатать в научно-популярных журналах статьи, претендующие на научные исследования в области нелинейной локации, причем на уровне "концепций". Поскольку в научно-популярных журналах отсутствует жесткая система оппонирования авторам статей, как это имеет место в академических изданиях, существует реальная возможность публикаций псевдонаучных результатов по рассматриваемому вопросу.

Данная тенденция весьма опасна, ибо вводит в заблуждение не только пользователей, но и молодых исследователей, которые ищут информацию по всем открытым источникам. Примером тому - опубликованная в журнале "Специальная техника" (№ 2 за 2001 г.) статья "Нелинейная радиолокация: принципы сравнения" [1].

В настоящей статье приводятся научно обоснованные методы сравнения, полученные теоретически и подтвержденные экспериментально.

1. Теоретические и экспериментальные исследования в нелинейной радиолокации

Интенсивные исследования в области нелинейной локации начались в начале 60-х гг. минувшего века, хотя эффект нелинейного взаимодействия был обнаружен еще в 1939 г. на судах ВМС США как эффект "ржавого болта", приводящий к помехам при работе мощных коротковолновых судовых радиостанций [2]. При рассмотрении взаимодействия ЭМП и нелинейного перехода на основе металлического контакта все внимание было уделено анализу преобразования частоты для третьей гармоники. Первое практическое применение НРЛС для дефектоскопии показано в [3-5]. В 70-х гг. интенсивность исследований резко возросла. В 1972 г. создается опытный образец американской НРЛС МЕТТРА с мощностью излучения 1 кВт, несущей частотой 750 МГц и частотой следования импульсов 10 кГц. В [6] показаны теоретические расчеты и экспериментальные исследования с этим локатором для наклонного зондирования объектов в приповерхностном слое. Аналогичные работы велись и в России [7]. Нетрудно понять, что эти исследования проводились с целью обнаружения мин, в том числе с электронными взрывателями. Широкое применение последних впервые было осуществлено Великобританией во время военного конфликта на Фолклендских островах. В [8] были приведены результаты экспериментальных исследований ло-

катора МЕТТРА на третьей гармонике для обнаружения с вертолета замаскированной бронетанковой техники. Результаты были отрицательными. Дальность (высота) обнаружения оказалась неудовлетворительной. В известных работах по НРЛ, например в [9], все исследования сводились к определению нелинейной эффективной поверхности рассеяния (НЭПР) металлического контакта σ и ее зависимости от плотности потока падающей мощности ($P_{пад}$). Но эта зависимость напрямую связана с зависимостью коэффициента нелинейного преобразования энного порядка (ξ_n) от величины подводимой к контакту мощности. Расчет значения ξ_n является наиболее трудоемким процессом. В [9] приводится зависимость НЭПР металлического контакта от наведенной ЭДС для третьей гармоники и показано, что она имеет квадратичный характер от подводимой мощности.

В начале 80-х гг. публикации иностранных исследователей по НРЛ резко прекратились. Однако отечественные исследования показали, что экспериментальные значения дальности обнаружения на второй гармонике не совпадали с расчетами по предложенной модели для третьей гармоники. Это потребовало проведения теоретических расчетов зависимости $\xi_2 = f(P_{пр объект})$. Параллельно были проведены теоретические расчеты зависимости $\xi_{2,3}$ от частоты зондирующего сигнала.

Следует отметить, что ВАХ любого *p-n*-перехода обладает температурной зависимостью, а, следова-



тельно, и ξ_n также будет зависеть от температуры.

Расчеты проводились как для СВЧ, так и для низкочастотных диодов по методике и программному обеспечению в [10].

На рис. 1 показана зависимость $\xi_2 = f(P_{пр. нэ})$ для диода 2А605Б, из которой следует, что $\xi_2 = k P_{пр. нэ}$, где $k = d\xi/dP_{пр. нэ} = \text{const}$ и для условий расчета $k = 2,14 \times 10^{-5}$ (1/Вт) в интервале $P_{пр. нэ} = (10^{-3} \div 5,5)$ Вт. Расчетная зависимость $\xi_2 = f(P_{изл. локат.})$ для диода 2А605 при мощности на диоде 160 мВт показана в [11].

На рис. 2 приведена зависимость $\xi_{2,3} = f(t, ^\circ\text{C})$, подтвержденная экспериментально. Расчеты и эксперимент показывают, что ξ_3 более чувствительна к изменению температуры. Этот факт очевиден и из теории полупроводниковых приборов. Температурная зависимость ξ имеет большое практическое значение в условиях российского климата со средними перепадами температур от -30°C до $+40^\circ\text{C}$. При практическом использовании локатора, например, в условиях Чечни для обнаружения радиуправляемых фугасов, этот фактор также будет влиять на максимальную дальность обнаружения в зависимости от погодного сезона.

Полученные теоретические результаты свидетельствуют, что ξ_2 , α , следовательно, и σ_2 прямо пропорциональны величине принимаемой объектом мощности (рис. 1 и [11, 12]), что равнозначно линейной зависимости от $P_{пад.}$ и $P_{изл. локт.}$

Экспериментальные исследования $P_{пр. лок.}$ от дальности для нелинейного отражателя в виде симметричного вибратора с диодом 2А605Б проводились в безэховой камере, близкой к свободному пространству, и показали, что $P_{пр. лок.} = f(1/r^4)$. Был проведен эксперимент, аналогичный показанному в [6], по наклонному зондированию малоразмерного сложного объекта. И здесь зависимость принимаемой мощности от дальности для второй гармоники полностью соответствовала классической. Первое практическое применение отечественного нелинейного локатора на второй гармонике произошло во время боевых действий в Афганистане для обнаружения противотанковых мин с электронными взрывателями производства стран НАТО. Второе применение мощного локатора осуществилось аналогично локатору МЕТТРА на вертолете для обнаружения остатков разбившегося в 1992 г. вертолета в Тюменской области [13].

Таким образом, основное уравнение для НРЛ на второй гармонике будет иметь вид [11, 12]:

$$P_{пр. локат.} = \frac{P_{изл. лок.} G_{изл. лок.} G_{пр. лок.} \lambda_{изл.}^2}{(4\pi r)^4} \times \left(\lambda_{изл./2} \right)^2 G_{вибр. пр.} G_{вибр. изл.} \xi_2(P_{изл. локт.; \lambda_{изл.}}) \quad (1)$$

где $G_{вибр. пр.}$, $G_{вибр. изл.}$ - коэффициенты усиления приемной и излучающей антенн вибратора (объек-

та) для $\lambda_{изл.}$ - принимаемой длины волны и $\lambda_{изл./2}$ - второй гармоники частоты, излучаемой вибратором соответственно.

В соответствии с моделью канала наблюдения в НРЛ [11] уравнение (1) можно записать как для радиолокационного наблюдения с активным ответом в режиме "свой - чужой". В канале с активным ответом активный ответчик принимает частоту запроса с $\lambda_{запрос.}$, формирует свой сигнал на частоте ответа с $\lambda_{ответ} \neq \lambda_{запрос.}$, при этом антенны ответчика согласованы как на прием, так и на передачу.

В нелинейной локации ситуация аналогичная: активный ответчик - нелинейный объект принимает частоту запроса от НРЛ с $\lambda_{изл. локт.}$, а ответ посылает на преобразованной частоте гармоник с $\lambda_{ответ} = \lambda_{изл. локт./n}$, где n - номер гармоники. Разница в том, что здесь одна и та же антенна объекта принимает излучение генератора и излучает преобразованную длину волны как ответчик. При этом ни приемная, ни излучающая антенны нелинейного ответчика не согласованы ни на прием, ни на излучение преобразованного сигнала [11, 12]. КПД преобразования принятой мощности (энергии) в мощность (энергию) гармоник соответствует безразмерной величине ξ_n , которая очень мала, при этом для разных гармоник имеет свою зависимость от $P_{пр.}$

Тогда (1) можно преобразовать к классическому виду активного наблюдения:

$$P_{пр. вибр. ответч.} = \frac{P_{изл.} G_{изл. лок.}}{4\pi r_1^2} \times \frac{G_{вибр. пр.} \lambda_{изл.}^2}{4\pi}$$

$$P_{пр. локт.} = \frac{P_{изл. вибр. ответч.} G_{вибр. изл./2}}{4\pi r_2^2} \times \frac{G_{пр. лок.} (\lambda_{изл./2})^2}{4\pi}$$

где: r_1 - расстояние от локатора до объекта, r_2 - расстояние от объекта до локатора, и представляют уравнение связи для НРЛ. При $r_1 = r_2$ (1) примет вид:

$$P_{пр. локт.} = \left\{ \left(\frac{P_{изл.} G_{изл. лок.}}{4\pi r^2} \times \frac{G_{вибр. пр.} \lambda_{изл.}^2}{4\pi} \right) \times \xi_2 \right\} \times \frac{G_{вибр. изл./2}}{4\pi r^2} \times \frac{G_{пр. лок.} (\lambda_{изл./2})^2}{4\pi} \quad (2)$$

и для уравнения связи означает, какова должна быть чувствительность приемника локатора при заданном максимальном расстоянии r_2 , чтобы выделить сигнал ответчика из собственных шумов приемника.

Уравнение связи в НРЛ постоянно используется оператором во время поисковых мероприятий. При неизменной мощности излучения происходит регулировка чувствительности приемника, что ука-

зывает на изменение расстояния r_2 в сторону уменьшения, хотя принимаемая объектом мощность в этом случае возрастает.

Здесь под круглой скобкой - величина мощности, принимаемая вибратором как активным ответчиком и подводимая к нагрузке; под квадратной скобкой - величина мощности второй гармоники, преобразованной нелинейным вибратором - ответчиком; под фигурной скобкой - величина плотности потока мощности, излучаемая ответчиком - вибратором. Последний сомножитель представляет собой эффективную площадь S_a приемной антенны локатора на частоте второй гармоники.

При рассмотрении реального объекта можно видеть, что его антенна - это статистически неопределенный набор (ансамбль) элементарных вибраторов, нагруженных на нелинейные элементы, имеющих произвольные значения длин l_i и расположенных в пространстве произвольным образом. Этот же набор элементарных вибраторов является и излучающей антенной объекта. При этом происходит взаимное влияние вибраторов друг на друга по всему ансамблю. Задача математического моделирования антенны со статистически неопределенным ансамблем взаимно дополняющих активных элементов антенны с различными параметрами на сегодня не решена. Тогда второй множитель в (1) для сложного объекта можно интерпретировать так:

$$\sigma_{\text{вибр. пр}} = \left(\frac{\lambda_{\text{изл}}}{2} \right)^2 \times \xi_2(P_{\text{изл. локт.}}, \lambda_{\text{изл}}) \quad (3)$$

Однако не следует забывать, что НЭПР не является const даже для одного и того же объекта, а представляет собой многофункциональную зависимую величину: $\sigma = f[\Pi_{\text{пад.}} = f(P_{\text{изл. локт.}}, r), \lambda_{\text{изл.}}, t, ^\circ\text{C}]$.

Для эталонного нелинейного отражателя, параметры которого на прием - излучение и величина принимаемой отражателем мощности, подводимой к нагрузке - поддаются расчету, следует использовать уравнение наблюдения с активным ответом по (2). Уравнения (1, 2) применимы к любой гармонике. На заре теоретических исследований по нелинейной локации формально была введена зависимость $R_{\text{пр. локт.}}$ от дальности в степени $(2n + 2, 2mn + 2)$ безо всякой привязки как к параметрам самого локатора, так и к частотной зависимости, хотя очевидно, что излучаемая объектом мощность есть функция $R_{\text{изл. объект.}} = f(\xi_n)$.

В [14] рассмотрено влияние антенно-фидерного тракта нелинейного объекта в виде рупорной антенны на дальность его обнаружения, а в [11] приведен расчет при внеполосном зондировании для обнаружения малозаметных летательных объектов типа ракеты Patriot с помощью НРАС на второй гармонике преобразованного сигнала. Расчет проводился для оптимизации частоты излучения локатора с целью уменьшения его мощности при задан-

ной дальности обнаружения ракеты в три километра. Выбор модели с рупорной антенной продиктован тем, что позволяет смоделировать коэффициент усиления антенны от единиц до 3×10^3 , что соответствует коэффициенту усиления фазированных антенных решеток любого типа, моделировать в широких пределах рабочий диапазон частот антенны объекта при наиболее простом, но строгом математическом моделировании самой антенны.

Задача поиска скрытых объектов маломощными локаторами полностью соотносится с рассмотренной в [11, 12], включая задачу по максимальной дальности обнаружения.

Многие результаты по нелинейной локации, полученные авторами настоящей статьи, до сих пор не подлежат публикации в открытой печати. Поэтому мы вынуждены делать ссылки на те небольшие фрагменты исследований, которые можно было опубликовать.

2. Расчет максимальной дальности обнаружения эталонного нелинейного отражателя нелинейным локатором

В [1] заявлено следующее: "Практика работы с НРА позволяет сделать вывод, что скорость перемещения антенны вдоль поверхности обследуемого объекта, а также расстояние до объекта поиска для всех НРА приблизительно одинаковы, поэтому объективное сравнение моделей можно было бы осуществить по максимальной дальности обнаружения некоторого эталонного нелинейного отражателя. К сожалению, это практически невозможно из-за организационных сложностей согласования конструкции такого отражателя с производителями аппаратуры и проведения регулярных сравнительных испытаний". В последней фразе этого тезиса (важного для авторов в концептуальном плане) и заложена ошибочность полученных ими в дальнейшем выводов и сравнительных результатов, отраженных в таблице 1 [1].

Кроме того, на основании своей "новой концепции" для расчета $K_{\text{эф.}}$ по [1], в табл. 1 представлен удивительный факт. По пяти моделям локаторов авторы вполне серьезно указывают коэффициент усиления антенн в (минус) 3 дБ! Известно, что ненаправленный излучатель - изотропный излучатель - обладает КНД в (0) дБ или равен единице. Напрашивается уместный вопрос: зачем разработчикам "понадобилось" изготавливать для локаторов антенны с КНД равным единице, сохранив при этом каким-то образом направленные свойства антенн с диаграммой 90-100°, а потери в фидере из подводящих СВЧ-кабелей с малым затуханием и длиной 1,2 м "специально" довести до (-3) дБ, то есть увеличить в два раза?! В рамках "новой концепции" авторы вводят новый параметр антенны: " $G_{\text{пер}}$ - коэффи-

циент усиления передающей антенны в ОБРАТНОМ направлении" [1]! К сожалению, авторы не раскрыли читателям ни математического описания этого важного параметра, ни его физического смысла, но, к счастью, для приемной антенны все осталось как прежде.

В действительности, поставленная в [1] задача для нелинейной локации, несмотря на революционность "новой концепции", решается довольно просто. Суть решения заключается в следующем. В качестве эталонного отражателя, как наиболее простого в расчетах и реализуемого в экспериментальных исследованиях, выбираем классический вибратор, у которого $l = 0.25 \lambda_0$, где λ_0 - рабочая длина волны вибратора; l - длина одного плеча вибратора.

Значение принятой вибратором мощности от любого излучающего генератора, которая подводится к нагрузке, можно вывести из известного классического выражения для симметричного вибратора, например в [15], имеющего вид:

$$P_{пр} = \frac{W_0 R_n P_{исл.} G_{исл.} h_n^2}{4\pi r^2 |Z_{вх.вибр} + Z_n|^2} \quad (4)$$

где: $P_{исл.}$ - мощность излучения генератора нелинейного локатора; $G_{исл.}$ - коэффициент усиления излучающей антенны генератора; h_n - действующая высота вибратора на принимаемой длине волны; R_n - сопротивление нагрузки, равное, например, 50 Ом; $W_0 = 120\pi$ - волновое сопротивление свободного пространства; r - расстояние от антенны генератора до вибратора; $Z_{вх.вибр}$ - входное сопротивление вибратора на любой принимаемой частоте; Z_n - сопротивление нагрузки вибратора. При $\lambda_{изл. локт.} = \lambda_{0 \text{ вибр.}}$, $Z_{вх.вибр} = Z_n^*$, то есть входное сопротивление и сопротивление нагрузки являются комплексно сопряженными и (4) соответствует $P_{пр \text{ вибр.}}$ по (2) под круглой скобкой.

В соответствии с задачей сравнения характеристик объективным фактором выступает отношение величин принимаемых мощностей локаторов по (1, 2) от отражателя на заданной дальности:

$$\frac{P_{пр \text{ локт. } i}}{P_{пр \text{ локт. } j}} = \frac{P_{исл. i} G_{исл. i} h_{i1}^2 \xi_{i1} G_{пр. локт. i} (R_{н i} / 2)^2}{P_{исл. j} G_{исл. j} h_{j1}^2 \xi_{j1} G_{пр. локт. j} (R_{н j} / 2)^2} \times$$

$$\times \frac{|Z_{вх. вибр. i} + Z_n|^2}{|Z_{вх. вибр. j} + Z_n|^2} = \beta$$

Расчет значения h_n и $G_{вибр.}$ как на прием частоты локатора, так и на излучение любой гармоники, осуществляется по известному выражению из [15]. Так же просто по [15] рассчитывается для вибратора и $Z_{вх. вибр.}$ на любой длине волны. Для упрощения расчета будем полагать, что вибратор нагружен на широкополосную нелинейную нагрузку, например широкополосный усилитель СВЧ или широкополосный смеситель, которые являются частотно-не-

зависимыми - согласованными на прием сигнала в диапазоне от $\lambda_{изл. i, j}$ до $\lambda_{изл. i, j} / 2$, то есть их $Z_n = f(\lambda_{изл.})$ постоянно в этом диапазоне.

Поскольку энергетические параметры локаторов $R_{изл.}$, $G_{изл.}$, $G_{пр. локт.}$ являются постоянными величинами, обозначим их отношение произведений как $K_{энерг.}$. Учитывая, что зависимость ξ_2 от мощности прямо пропорциональна, но имеет сложную зависимость от частоты [11], введем коэффициент $K_\xi = \xi_2 \lambda_{i \text{ изл.}} / \xi_2 \lambda_{j \text{ изл.}}$. Тогда (5) преобразуется к виду:

$$\frac{P_{пр \text{ локт. } i}}{P_{пр \text{ локт. } j}} = \frac{\xi_{i2} h_{i1}^2 G_{исл. i} (R_{н i} / 2)^2 |Z_{вх. вибр. i} + Z_n|^2}{\xi_{j2} h_{j1}^2 G_{исл. j} (R_{н j} / 2)^2 |Z_{вх. вибр. j} + Z_n|^2} = \beta \quad (6)$$

В расчете используем следующий прием: поскольку частоты локаторов постоянны, будем изменять рабочую частоту вибратора $f_{0i \text{ вибр.}}$, то есть его $\lambda_{0i \text{ вибр.}}$.

Для расчета прежде всего определим допустимую частотную область работы любого вибратора с $f_{0i \text{ вибр.}}$ как для принимаемой частоты локатора, так и для излучаемой второй гармоники, в которой применим строгий математический аппарат [15]:

$$\frac{l_{\text{вибр.}}}{\lambda_{\text{изл. локт.}}} = \frac{0.25 \lambda_{0 \text{ вибр.}}}{\lambda_{\text{изл. локт.}}} = \frac{0.25 f_{\text{изл. локт.}}}{f_{0 \text{ вибр.}}} = (0.2 \div 0.7) \quad (7)$$

$$\frac{l_{\text{вибр.}}}{(R_{н \text{ локт.}} / 2)} = \frac{0.25 (2 f_{\text{изл. локт.}})}{f_{0 \text{ вибр.}}} = (0.2 \div 0.7)$$

Это также означает, что имеется множество нелинейных объектов с рабочими частотами $f_{0i \text{ вибр.}}$ по (7). Данное условие указывает еще на один аспект нелинейной локации. Несмотря на то что локатор излучает монохроматическую частоту, он обладает диапазонным свойством обнаружения объектов в частотной области.

Наибольший интерес представляет сравнение локаторов со значительно отличными частотами излучения, поэтому выберем $f_{изл. локт.} = (680, 860, 900, 1000)$ МГц. Тогда из (7) диапазон частот вибраторов на прием частоты $f_{1 \text{ изл. локт.}} = 680$ МГц составит (243 ÷ 850) МГц, а для излучения второй гармоники - (485 ÷ 1700) МГц. Сравнивая эти два диапазона, находим, что общий для них есть (485 ÷ 850) МГц. Аналогично для $f_{2 \text{ изл. локт.}} = 860$ МГц общий диапазон - (615 ÷ 1075) МГц, для $f_{3 \text{ изл. локт.}} = 900$ МГц - (645 ÷ 1125) МГц и для $f_{4 \text{ изл. локт.}} = 1000$ МГц - (715 ÷ 1250) МГц.

Для наглядности сравнения примем энергетические параметры всех локаторов равными: $R_{изл.} = 150$ Вт, $G_{изл.} = 5$, $G_{пр. локт.} = 6.3$, что соответствует параметрам локатора NR-900E [16]. Значение $\xi_2 = k R_{пр. вибр.}$, где $k = 2.14 \cdot 10^{-5}$ (1/Вт) из расчета (рис. 1); $R_{пр. вибр.}$ рассчитывается по (4). Расчет параметров h_n , $G_{вибр.}$, $\lambda_{изл.}/2$, $Z_{вх. вибр.}$ производился прямым решением интегрального уравнения Халлена [15], что сегодня не представляет технических сложностей. Точное решение уравнения Халлена позволяет рассчи-

тывать параметры вибратора по условию (7) в более широком диапазоне: (0,05-0,7). В расчетах был выбран "толстый" вибратор с отношением ($l_{\text{вибр.}}/d$) = 10, где d - диаметр вибратора, и учтено, что поляризация излучаемого сигнала круговая, как и то, что линейно-поляризованный сигнал вибратора принимается антенной локатора с круговой поляризацией. Тогда зависимости $P_{\text{пр. локт.}}$ по (2) при заданном расстоянии $r = 3$ м будут иметь следующий вид (рис. 3). Из этих зависимостей с очевидностью следует, во-первых, диапазонные свойства локаторов, во-вторых, с точки зрения энергетики, наиболее эффективным является низкочастотный локатор. Для сравнения на рис. 3 (5) приведена зависимость для локатора "Циклон-М1А" с $f_{1 \text{ изл. локт.}} = 680$ МГц и локатора NR900E с $f_{3 \text{ изл. локт.}} = 900$ МГц (3), параметры которых представлены производителями в [16].

На рис. 4 показаны зависимости $10 \log \beta$ по (6) без учета коэффициента K_{ξ} для трех локаторов с $f_{1 \text{ изл. локт.}} = 680$ МГц, $f_{2 \text{ изл. локт.}} = 860$ МГц, $f_{3 \text{ изл. локт.}} = 900$ МГц. Поскольку в расчете энергетические параметры локаторов равные, то $K_{\text{энерг.}} = 1$, а значение β в данном случае характеризует только относительную частотную зависимость восприимчивости вибраторами частот излучения локаторов и переизлучение их вторых гармоник в общем для локаторов диапазоне частот вибраторов. На частоте 905 МГц $\beta_{1/2} = 1$ и находится за резонансом $f_{2 \text{ изл. локт.}} = 860$ МГц; $\beta_{1/3} = 1$ на частоте 928 МГц, так же за резонансом $f_{3 \text{ изл. локт.}} = 900$ МГц, при этом в обоих случаях требуемая чувствительность приемника низкочастотного локатора (рис. 3) менее (-115) дБ. Для локаторов с близкими частотами 860 МГц и 900 МГц (рис. 4) следует, что в диапазоне (645 - 1100) МГц зависимость $\beta_{2/3}$ менее существенна, а $\beta_{2/3} = 1$ на 1050 МГц. Расстройка на 40 МГц не ведет к существенному увеличению эффективности ни по полосе частот, ни по энергетике (рис. 3), однако, игнорировать эту разницу нельзя.

Для реальных локаторов $\beta_{\text{ЦиклонМ1А/NR-900E}} = 1$ на 945 МГц (рис. 4 (4)). Это еще раз подтверждает большую эффективность низкочастотного локатора в своей полосе частот.

В расчетах и их результатах (рис. 3, 4) не учитывалась частотная зависимость $\xi_2 = f(f_{\text{изл. локт.}})$ и K_{ξ} , но чем меньше значение fT - граничное значение рабочей частоты полупроводниковых приборов, используемых в объекте, тем больше эта зависимость. Учет зависимости $\xi_2 = f(f_{\text{изл. локт.}})$ приведет к еще большему увеличению эффективности низкочастотного локатора с одновременным расширением частотного диапазона обнаружения при прочих равных условиях.

Простое сравнение по энергетическим параметрам в нелинейной локации является не совсем корректным, ввиду сильной зависимости от частоты локатора. Положим, что чувствительность прием-

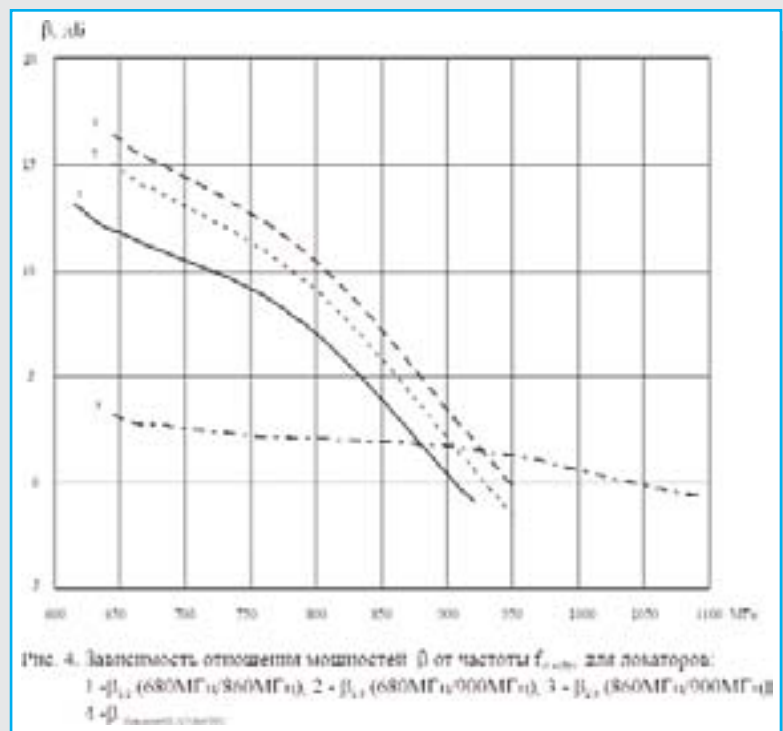
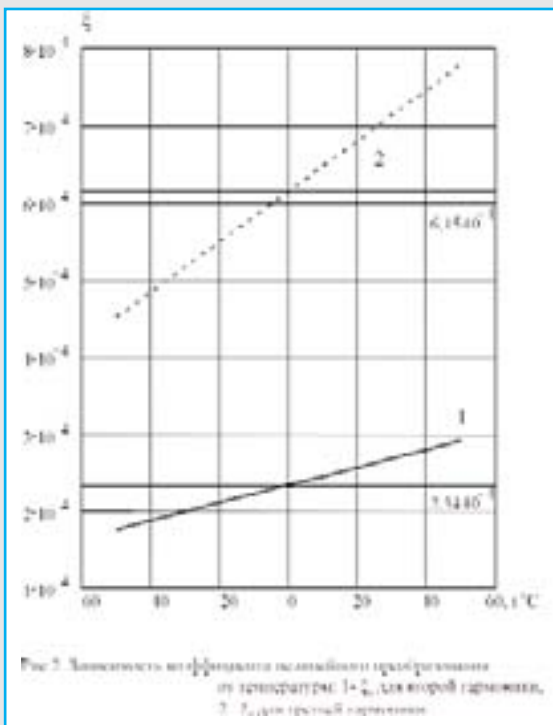
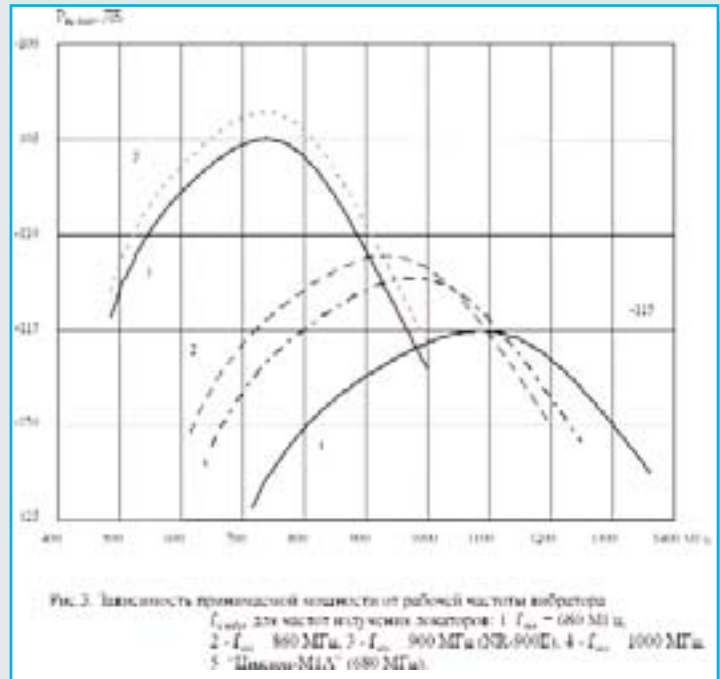
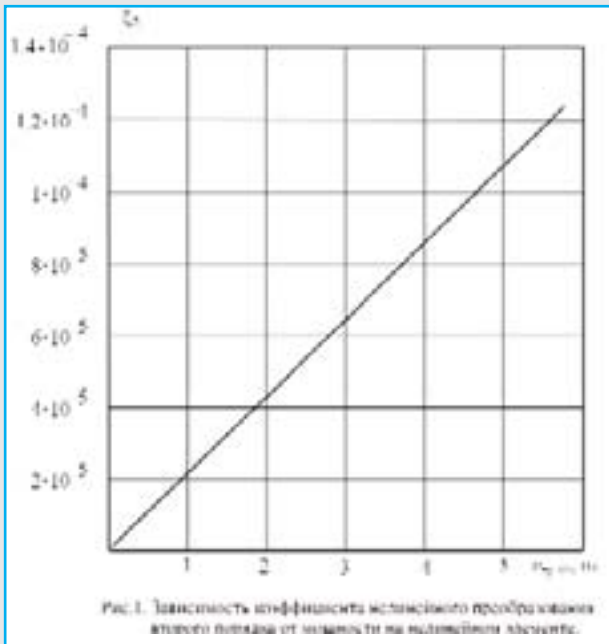
ников всех локаторов равная и составляет, например, (-115) дБ Вт, то есть условие связи выполняется по заданной чувствительности приемника. Тогда (рис. 3) в нелинейной локации следует, что при равных энергетических параметрах и априори неизвестной рабочей частоте объекта, но предполагаемом частотном диапазоне, в котором объект может работать, например, (100 ÷ 1000) МГц, наиболее эффективным является излучение локатора в низкочастотной части диапазона (в нашем примере это 680 МГц), при этом перекрывается половина диапазона локатора на 900 МГц.

Если предполагаемый рабочий диапазон объекта составляет, например, (650 ÷ 1500) МГц, эффективнее применение локатора на 900 МГц, но при этом, на дальности обнаружения 3 м, для расширения полосы обнаружения потребуется увеличение его энергетических параметров на (8 - 10) дБ (рис. 3). Этот же результат, но для рупорной антенны объекта в сантиметровом диапазоне (3.0 - 10.0) ГГц показан и в [11, 14].

Для практического обнаружения объектов на большой дальности реально применимы только импульсные локаторы. Расчет по реальным параметрам импульсных локаторов из [1, 16] с мощностями (150 - 400) Вт на дальности 3 м не меняет картину (рис. 3). Локатор "Циклон-М1А" с $f_{\text{изл. локт.}} = 680$ МГц остается максимально эффективным в полосе частот до 1000 МГц. На дальности 4.0 м ни один импульсный локатор, кроме "Циклона-М1А", не обнаруживает эталонный нелинейный отражатель даже на своих резонансных частотах излучения, поскольку при реальной чувствительности их приемников по ТТХ на расстоянии 4.0 м нарушается уравнение связи. Расчет по инженерным формулам [15] с поправками для $Z_{\text{вх вибрт.}}$ несущественно меняет картину частотного диапазона локаторов, но ведет к погрешности в сторону увеличения значений $P_{\text{пр. локт.}}$.

Таким образом, при выбранной частоте излучения и заданном диапазоне обнаружения, приведенная методика расчета позволяет определить энергетические параметры локатора для обнаружения объектов на заданной дальности. Это и есть решение той задачи, которую поставили авторы в предисловии к своей статье [1] (цитата: "Метод оценки одного из показателей эффективности соответствия НРЛ основной цели - способности обнаруживать объекты поиска"), но не решили ее.

Расчет проводился для условий свободного пространства. При анализе эффективности локаторов по максимальной дальности обнаружения объектов, находящихся на поверхности или под поверхностью проводящей или полупроводящей среды (грунт), не следует забывать очень важный факт, а именно: в этом случае эффективная действующая высота антенны h_d увеличивается, что эквивалентно смещению резонансных свойств в более низкую частот-



ную область. Фрагментарно это показано в [7].

Поскольку при проведении экспериментальных сравнений объективным параметром является только максимальная дальность обнаружения одного и того же объекта, определяемая параметрами локатора, включая и его частоту излучения, то в отличие от утверждения авторов [1], не требуется ни с кем никакого согласования по типу объекта обнаружения. Эксперимент лишь подтвердит расчетные значения: частотную зависимость и оптимальную частотную область применения той или иной модели локатора, что и является фактором эффективности.

Наглядный пример вышеизложенному - результаты сравнительных испытаний пяти моделей НРЛ в ГРУ ГШ МО [17] по максимальной дальности обнаружения объектов - различных радиомикрофонов (РЗУ) с рабочим диапазоном (108 ÷ 418) МГц, обнаружение контрольного устройства локатора NR-900E, а также обнаружения РЗУ, находящегося в кармане пиджака и расположенного в платяном шкафу. Дальность обнаружения всех объектов по [17] локатором с частотой 680 МГц превосходила дальность их обнаружения остальными локаторами (авторы имеют копию протокола испытаний). Обнаружения РЗУ с $f_{РЗУ} = 418$ МГц составила: на 680 МГц - 2.5 м, на 900 МГц - 1.9 м., из (1, 2). Эффективность по обнаружению контрольного устройства локатора NR-900E составила +10,6 дБ в сравнении с самим локатором NR-900E. При обнаружении РЗУ в платяном шкафу на расстоянии 40 см до объекта эффективность низкочастотного локатора составила +45 дБ относительно NR900E! Эти результаты служат лишь экспериментальным подтверждением приведенным расчетам эффективности низкочастотного локатора в его рабочей полосе частот (100 - 1000) МГц при заданной чувствительности его приемника.

Повышенная дальность обнаружения в экспериментах [17] низкочастотным локатором дополнительно объясняется влиянием частотной зависимости $\xi_2 = f(f_{\text{физ. локт.}})$.

Итак, расчеты показывают, что введенные в [1] коэффициенты эффективности локаторов представляют собой набор абстрактных цифр, которые для нелинейной локации не имеют физического смысла. В нелинейной локации при определении эффективности той или иной модели следует вести речь не просто о конкретной цифре энергетических параметров, а указывать на конкретный частотный диапазон, в котором эффективна каждая модель. Это особенно важно, когда речь идет о максимальной дальности обнаружения. При обнаружении низкочастотной звукозаписывающей аппаратуры РЗУ с частотами излучения до 1000 МГц можно лишь говорить о том, что низкочастотный локатор предпочтительнее, поскольку работает по всему этому диапазону, обладая повышенной дальностью обнаружения

в низкочастотной области и сравнимой дальностью в высокочастотной [18]. Это же относится к поиску РЗУ на местности, например, радиоуправляемых взрывателей, для которых рабочий диапазон в большинстве случаев много ниже 1000 МГц; к электронным взрывателям с внутренним программируемым таймером и электронным взрывателям противотанковых мин. В других ситуациях для более высокочастотного диапазона предпочтительнее использовать высокочастотный локатор. Попытка в [1] представить NR-900 как "новую концепцию эффективности" является псевдонаучной.

В [1] авторы приводят анализ чувствительности приемного тракта. Но, рассматривая чувствительность приемника в рамках статистической радиотехники, необходимо учитывать такой важнейший параметр, как помехозащищенность. Что касается локаторов, работающих на частотах в диапазоне 890 - 910 МГц, с точки зрения помехозащищенности, они обладают наивысшей вероятностью ложных срабатываний. Объяснение довольно простое. Массовое внедрение мобильных средств связи системы GSM-900, GSM-1800 привело к тому, что при работе радиотелефона на частоте 1800 МГц вблизи локатора приемник локатора принимает сигнал радиотелефона как сигнал второй гармоники от объекта, что есть ложное срабатывание. Даже при работе телефона на частоте 900 МГц возможно возбуждение сторонних объектов, сигнал гармоники от которых, в силу достаточно высокой чувствительности приемника локатора, будет принят им как ложное срабатывание. Поскольку избирательность приемника импульсных локаторов на высоких частотах - вторых гармониках - невелика, то помеха от радиотелефонов будет наблюдаться и у локаторов со значением, близким к частоте 900 МГц.

Второй важный фактор - электромагнитная совместимость локатора в диапазоне частот. Здесь помеха может возникать по иной причине, которую в рамках одной статьи невозможно рассмотреть, но специалистам это явление件но.

Классическим примером можно считать локаторы NR-μ и "Катран". Режим μ усложняет локатор и является "расплатой" для самих разработчиков за выбранное ими значение рабочей частоты - 848 МГц. Никаких дополнительных функций в диапазоне перестройки $\mu = 12$ МГц, которые бы придали локатору более высокие ТТХ, этот режим не несет, что было показано выше. Об этом разработчики и предупреждают пользователей в рекламном буклете каталога [16], где для локатора NR-μ на первое место вынесено: **"Возможность частотной отстройки от внешних помех"**. Вот вам и ответ о назначении режима μ! Отойдя от 900 МГц в локаторе NR-900, попали, что называется, "из огня да в полымя". Аналогичное наблюдаем и в локаторе "Катран" [16], где перестройка равна 10 МГц от частоты 885

МГц. Эти два примера свидетельствуют об электромагнитной несовместимости локатора с частотной обстановкой в эфире. Эффективность перестройки частоты для нелинейного локатора имеет место в полосе (100 - 500) МГц [3], а не в (10 - 15) МГц. Однако это уже материал для другой статьи.

Факторы помехозащищенности и электромагнитной совместимости напрямую влияют на эффективность локатора, а этот вопрос в [1] был попросту "не замечен".

Анализируя эффективность нелинейного локатора, нельзя не остановиться еще на одном параметре, которым является режим "20К". Впервые этот режим был реализован в одной из моделей военного локатора. Затем режим "20К" был применен в известном локаторе "Октава-К" и с него скопирован в NR-900, хотя для последних двух моделей это соответствует "13К". Принцип работы режима "К" авторам настоящей статьи давно известен и исследован ими, но интересно было узнать о его смысле и назначении от самих производителей.

Заключение

Проведенный анализ, основанный как на теоретических исследованиях, так и на экспериментальных результатах, показал, что объективным параметром сравнения эффективности должна служить величина принимаемых от эталонных отражателей мощностей сравниваемых локаторов при равной заданной дальности обнаружения с учетом не только их энергетических, но обязательно и с учетом их частотных параметров, которые в первую очередь связаны с частотными свойствами реальных объектов. При этом эффективность оценивается по полосе частот, в которой возможно обнаружение объекта, при заданной на локатор чувствительности его приемника. Вести же речь об эффективности как о некой безликой цифре для нелинейной локации неприемлемо.

Выводы и полученные результаты по [1] свидетельствуют о некомпетентности авторов при проведении анализа НРА. Об этом говорит и их собственное признание в [1]: "Нелинейные отражатели отличаются большим разнообразием схемных и конструктивных решений, и оценить уровень сигнала, выделяемого на нелинейном элементе, затруднительно" (!). Однако данное утверждение не имеет оснований: оценить этот уровень возможно для любого локатора, независимо ни от схемного решения, ни от конструкции нелинейного отражателя. Требуется лишь желание и, конечно, знание вопроса. Наиболее просто это можно сделать для симметричного вибратора. Практика показывает, что расчетные значения для данного нелинейного отражателя имеют высокую степень совпадения с экспериментальными результатами.

Приходится констатировать, что статья [1] есть не что иное, как рекламный трюк локатору NR-900, основанный на псевдонаучных рассуждениях.

Авторы настоящей статьи приносят свои извинения за достаточно резкий тон полемики в отношении обсуждаемой публикации и за категоричность заключения, однако более лояльно выразиться по данному факту не представляется нам возможным.

Литература

1. Калабухов В.А., Ткачев Д.В. Нелинейная радиолокация: принципы сравнения. "Специальная техника", 2001 г., № 2, с. 28.
2. Eastman A., Horle L. Proc. IRE, 1940, v. 28, p. 438.
3. Петерсон, Харрис. Обнаружение дефектов пассивных компонентов с помощью измерения гармоник. "Электроника", 1966 г., т. 39, № 14, с. 22.
4. Борисов А.Р., Вернигоров Н.С. Способ контроля параметров полупроводниковых приборов. Авторское свидетельство № 157404, 1988 г.
5. Борисов А.Р., Вернигоров Н.С., Парватов Г.Н. и др. СВЧ-метод дистанционной диагностики полупроводниковых приборов на основе нелинейного рассеяния. Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Оптический, радиоволновый и тепловой методы неразрушающего контроля". Могилев, 1989 г., ч. 2.
6. Harger R.O. IEEE, 1976, v. AES-12, № 2, p. 230.
7. Щербаков Г.Н. Применение нелинейной радиолокации для дистанционного обнаружения малоразмерных объектов. "Специальная техника", 1999 г., № 1, с. 34.
8. Danber D.A., Hull D. Mettra signature - radar section measurement. Final Report instrmetion Manual. San-Diego, 1978.
9. Штейншлейгер В.Б. Нелинейное рассеяние радиоволн металлическими объектами. "Успехи физических наук", 1984 г., т. 142, вып. 1, с. 131.
10. Жаркой А.Г., Туев В.И. Моделирование и автоматизированный расчет нелинейных искажений в усилителях на биполярных и полевых транзисторах. Томск. "Ротапринт ТИАСУР", 1986 г.
11. Вернигоров Н.С. Процесс нелинейного преобразования и рассеяния электромагнитного поля электрически нелинейными объектами. "Радиотехника и электроника", 1997 г., т. 42, № 10, с. 1181.
12. Вернигоров Н.С., Кузнецов Т.В. Влияние параметров нелинейного радиолокатора на эффективность обнаружения радиозлектронных устройств. Труды докладов Международной конференции "Информационные системы и технологии ИСТ-2000". Новосибирск, 2001 г.
13. Вернигоров Н.С. Методическое пособие "Особенности устройств съема информации и методы их блокировки". Томск. Изд. "Пиллад", 1996 г.
14. Вернигоров Н.С., Харин В.Б. Влияние антенно-фидерного тракта нелинейного объекта на дальность обнаружения в нелинейной локации. "Радиотехника и электроника", 1997 г., т. 42, № 12, с. 1447.
15. Айзенберг Г.З., Ямпольский В.Г., Терешкин О.Н. Антенны УКВ, ч. 1. М. "Связь", 1977 г., 384 с.
16. Каталог "Защита речевой информации: технические средства и услуги". "Конфидент", 2001 г., № 4, с. 82.
17. Топоровский П. Средства нелинейной радиолокации: реальный взгляд (исправление опечатки таблицы 2). "Системы безопасности", 1999 г., № 2, с. 96.
18. Вернигоров Н.С. Использование нелинейного локатора для раннего обнаружения устройств звукозаписи. "Конфидент", 2001 г., № 4, с. 50.