

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.4.1>

УДК: 621.396.96

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ГЕОРАДАРА ИЗ-ЗА НЕЛИНЕЙНОСТИ ЛЧМ ГЕНЕРАТОРА, УПРАВЛЯЕМОГО НАПРЯЖЕНИЕМ

А.И. Баскаков, А.А. Комаров, К.Ю. Кожевников, М.С. Михайлов

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14

Статья поступила в редакцию 20 апреля 2022 г.

Аннотация. В данной работе показана важность такого параметра, как линейность модуляционной характеристики генератора зондирующего сигнала линейно-частотной модуляции (ЛЧМ) георадара. Возникающая из-за нелинейности этой характеристики погрешность в определении глубины залегания искомого подземного объекта может оказаться недопустимо большой. Рассмотрена методика расчета погрешности и дан пример расчета нелинейности модуляционной характеристики и максимально допустимого отклонения частоты от линейного закона в диапазоне перестройки частоты генератора, управляемого напряжением (ГУН).

Ключевые слова: георадар, поиск подземных вод, электрофизические характеристики грунта, генератор, управляемый напряжением, нелинейность модуляционной характеристики, глубина залегания объекта.

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Министерства культуры, образования, науки и спорта Монголии в рамках научного проекта № 19-57-44001

Автор для переписки: Комаров Алексей Александрович,
KomarovALA@mpei.ru

Введение

В настоящее время активно развивается применение методов радиолокации для подповерхностного зондирования. Радиолокация позволяет измерять толщину подповерхностных слоев с различными электрофизическими свойствами и расстояние до них, определить глубину залегания различных объектов, а также получать некоторые структурные и электрические характеристики подповерхностных образований [1]. Обычно применяются два метода реализации георадаров: импульсный метод предполагает использовать в качестве зондирующего сигнала видеоимпульсы наносекундной длительности при амплитуде в десятки и сотни вольт и непрерывный метод, предполагающий использование широкополосных зондирующего сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). В принципе частотный и импульсный методы равноценны, они отличаются только технической реализацией. Преимущество частотного метода в том, что он не требует высоковольтного формирователя зондирующего сигнала и приемного стробоскопического преобразователя, который в этом случае заменяется смесителем и последующим спектральным анализом (БПФ). Однако необходимо обратить внимание на требуемую от ЧМ генератора линейность перестройки частоты в заданном диапазоне, поскольку отклонение от линейного закона из-за модуляционных искажений может привести к недопустимо большим погрешностям в определении глубины залегания искомых подповерхностных объектов.

1. Оценка погрешности георадара при определении глубины залегания искомого объекта из-за нелинейности модуляционной характеристики ЧМ генератора

Пусть закон изменения частоты в сигнале с ЛЧМ при наличии модуляционных искажений отличается от линейного. Моделируя модуляционные искажения в виде гармонической функции, текущую фазу и частоту сигнала представим в следующем виде

$$\varphi(t) = \omega_0 t + Bt^2 + B_{\text{пм}} \cdot \sin(\omega_{\text{пм}} t + \theta), \quad (1)$$

где $B = \pi \Delta F / T_M$ – крутизна перестройки частоты в неискаженном сигнале; ΔF – удвоенная девиация частоты в сигнале; T_M – период модуляции несимметричного ЛЧМ-сигнала; θ – начальная фаза; $B_{\text{пм}}$ – индекс и $\omega_{\text{пм}}$ – частота паразитной модуляции, соответственно, приводящей к нелинейным искажениям.

Тогда мгновенная частота сигнала будет определяться соотношением

$$\omega(t) \equiv \frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega_0 + 2Bt + B_{\text{пм}} \omega_{\text{пм}} \cos(\omega_{\text{пм}} t + \theta). \quad (2)$$

Принцип действия ЧМ георадара основан на анализе спектра сигнала на выходе смесителя приемника, в котором смешиваются частоты опорного (зондирующего) и отраженного сигналов [1].

Рассмотрим случай отражения от непротяженного подповерхностного объекта при отсутствии искажений в зондирующем сигнале. В этом случае частота биений на выходе смесителя (рис.1) оказывается пропорциональной глубине, на которой искомый объект расположен

$$\Delta\omega_B = 2\pi\Delta f_B = \omega(t_{\text{изл}}) - \omega(t_{\text{отр}}) = 2B\Delta t, \quad (3)$$

$$\Delta t = \frac{2R}{V}, \quad (4)$$

где $V = c / \text{Re} \sqrt{\dot{\epsilon}}$ – скорость распространения электромагнитной волны в среде, c – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме, $\dot{\epsilon}$ – относительная комплексная диэлектрическая проницаемость среды, R – глубина расположения отражающего объекта.

Тогда получим

$$R = \frac{1}{2} \frac{\Delta f_B}{\Delta F} T_M V. \quad (5)$$

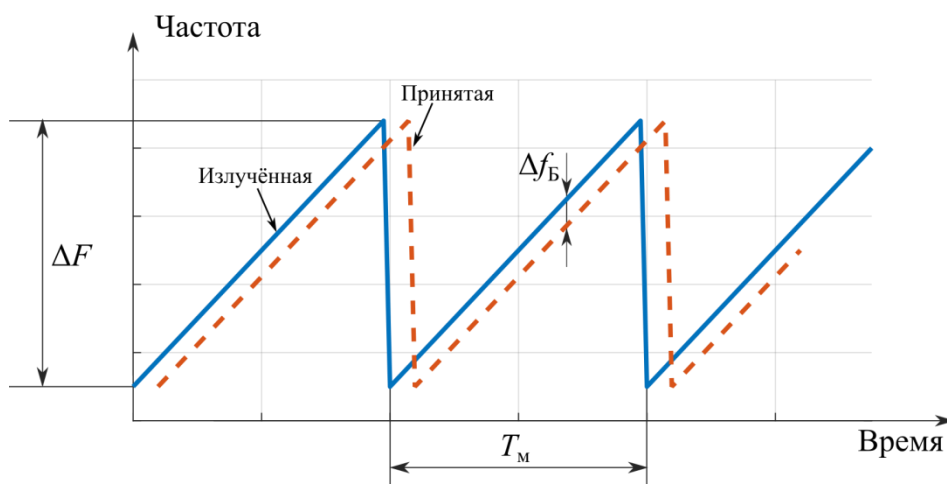


Рис. 1. Линейная зависимость частоты биений Δf_b от временного сдвига между излученным и принятым сигналами

Если же в сигнале имеются искажения, т.е. $B_{\text{пм}} \neq 0$, то частота биений после смесителя не постоянна, подвержена флуктуациям, а спектр сигнала искажается. Это неизбежно приведет к погрешности определения глубины подповерхностного объекта. Оценим эту погрешность. Сначала определим частоту биений на выходе смесителя.

$$\begin{aligned} \Delta\omega_b(t) &= 2\pi\Delta f_b = 2B\Delta t + B_{\text{пм}}\omega_{\text{пм}} \left[\cos(\omega_{\text{пм}}t_{\text{изл}} + \theta) - \cos(\omega_{\text{пм}}t_{\text{отр}} + \theta) \right] = \\ &= 2B\Delta t - 2B_{\text{пм}}\omega_{\text{пм}} \sin\left(\frac{\omega_{\text{пм}}\Delta t}{2}\right) \sin\left(\omega_{\text{пм}}\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) + \theta\right) \end{aligned} \quad (6)$$

Введем количество периодов паразитной модуляции, укладывающейся на интервале, равном периоду модуляции T_m

$$n = F_{\text{пм}}T_m. \quad (7)$$

Тогда

$$\Delta\omega_b(t) = 2B\Delta t - B_{\text{пм}} \frac{4\pi n}{T_m} \sin\left(\frac{\pi n \Delta t}{T_m}\right) \sin\left(\frac{2\pi n}{T_m}\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) + \theta\right). \quad (8)$$

В (8) величина начальной фазы θ существенна при $n < 1$, так как изменяет среднюю частоту сигнала. Выражение (8) с учетом (4) можно упростить, поскольку $\Delta t \ll T_m$

$$\begin{aligned} \Delta f_b(t) &= \frac{2R}{VT_M} \Delta F - 4\pi n^2 \frac{B_{\text{ПМ}}}{VT_M^2} R \sin\left(\frac{2\pi n}{T_M}\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) + \theta\right) = \\ &= \frac{2R}{VT_M} \Delta F \left\{ 1 - 2\pi n^2 \frac{B_{\text{ПМ}}}{\Delta FT_M} \sin\left(\frac{2\pi n}{T_M}\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) + \theta\right) \right\}. \end{aligned} \quad (9)$$

В этом выражении абсолютную погрешность оценки глубины подповерхностного объекта из-за нелинейности модуляционной характеристики генератора удобно обозначить как

$$\delta R = 2\pi n^2 \frac{B_{\text{ПМ}}}{\Delta FT_M} R = 2\pi n^2 \frac{B_{\text{ПМ}}}{D} R, \quad (10)$$

где $D = \Delta FT_M$ – база (или коэффициент сжатия) ЛЧМ сигнала.

Тогда относительная погрешность оценки может быть представлена

$$\frac{\delta R}{R} = 2\pi n^2 \frac{B_{\text{ПМ}}}{D}. \quad (11)$$

Итак, погрешность оценки глубины расположения подповерхностного объекта сказывается тем меньше, чем больше база ЛЧМ-сигнала, меньше количество периодов искажающей функции n и меньше индекс паразитной угловой модуляции $B_{\text{ПМ}}$. Из (10) также следует, что абсолютная погрешность растет с увеличением глубины расположения искомого объекта R .

Нетрудно показать, что относительная погрешность оценки глубины подповерхностного объекта $\delta R/R$ определяет требуемую линейность перестройки частоты в ЛЧМ сигнале. Используя (2), найдем скорость изменения частоты в сигнале

$$\gamma = \frac{d\omega}{dt} = 2B - B_{\text{ПМ}} \omega_{\text{ПМ}}^2 \sin(\omega_{\text{ПМ}} t + \theta) = \gamma_0 + \Delta\gamma, \quad (12)$$

где $\gamma_0 = 2B = 2\pi\Delta F/T_M$ – скорость изменения частоты при отсутствии искажений, а $\Delta\gamma = -B_{\text{ПМ}} \omega_{\text{ПМ}}^2 \sin(\omega_{\text{ПМ}} t + \theta)$ – приращение скорости изменения частоты при наличии искажений.

Тогда имеющуюся нелинейность перестройки частоты в ЛЧМ сигнале обозначим как отношение

$$\frac{|\Delta\gamma_{\max}|}{\gamma_0} = \frac{B_{\text{ПМ}}\omega_{\text{ПМ}}^2}{2B} = 2\pi n^2 \frac{B_{\text{ПМ}}}{D}, \quad (13)$$

или используя (11), получим

$$\frac{|\Delta\gamma_{\max}|}{\gamma_0} = \frac{\delta R}{R}. \quad (14)$$

Для того чтобы задать допустимую нелинейность перестройки частоты ЧМ генератора, необходимо сравнивать возникающую при этом погрешность определения глубины расположения объекта δR с разрешающей способностью зондирующего сигнала

$$\Delta R = \frac{c}{2\Delta F \operatorname{Re}\sqrt{\epsilon}}. \quad (15)$$

Обычно величина ΔR задается исходя из требуемых тактических характеристик георадара, при этом необходимо обеспечить $\delta R \ll \Delta R$.

Максимально допустимое отклонение частоты от линейного закона из-за наличия нелинейности, как следует из (2), равно

$$\delta\omega_{\max} = B_{\text{ПМ}}\omega_{\text{ПМ}}. \quad (16)$$

Тогда с использованием (13), получим

$$\delta f_{\max} = B_{\text{ПМ}}f_{\text{ПМ}} = \frac{|\Delta\gamma_{\max}|}{\gamma_0} \frac{Df_{\text{ПМ}}}{2\pi n^2} = \frac{|\Delta\gamma_{\max}|}{\gamma_0} \frac{\Delta F}{2\pi n}. \quad (17)$$

2. Пример расчета нелинейности модуляционной характеристики и возникающей при этом погрешности оценки глубины объекта для генератора георадара на микросхеме JTOS-400+

В геолокации, кроме значительного затухания сигнала в грунте, существует проблема априорной неопределенности электрофизических характеристик среды распространения. Но в случае сухого грунта его диэлектрическая проницаемость почти для всех видов грунта является примерно одинаковой [2]. Это обстоятельство позволяет нам считать грунт засушливой и пустынной местности для зондирующего сигнала примерно однородным, даже если почва состоит из нескольких слоев.

В качестве примера рассмотрим ЛЧМ генератор для георадара, реализованный на базе микросхемы JTOS-400+ компании Mini-Circuits [3]. Данная микросхема позволяет формировать ЧМ сигнал в диапазоне частот от 200 до 380 МГц, т.е. $\Delta F = 180$ МГц. Ее модуляционная характеристика при температуре +25 °С приведена на рис. 2.

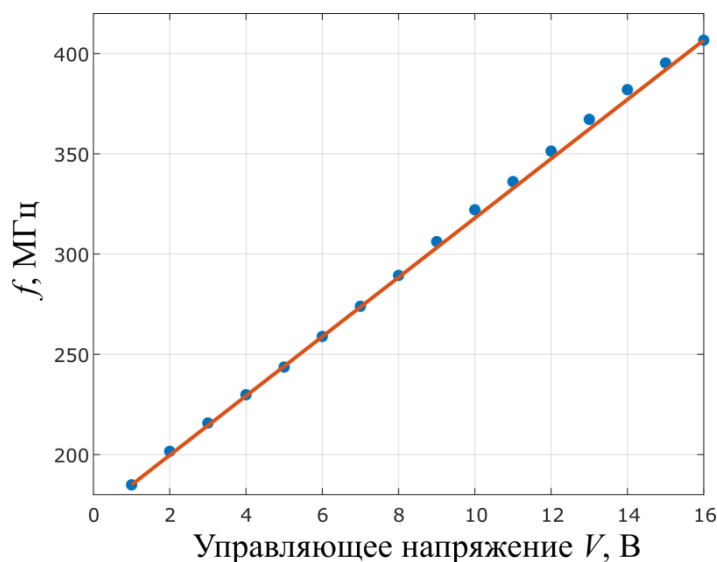


Рис. 2. Модуляционная характеристика ГУН на базе микросхемы JTOS-400+: синие точки – экспериментальные данные; красная линия – линейная аппроксимация

Максимальное отклонение частоты от линейного закона составляет $\delta f_{\max} = 2,5$ МГц, $n = 1$ (рис. 3).

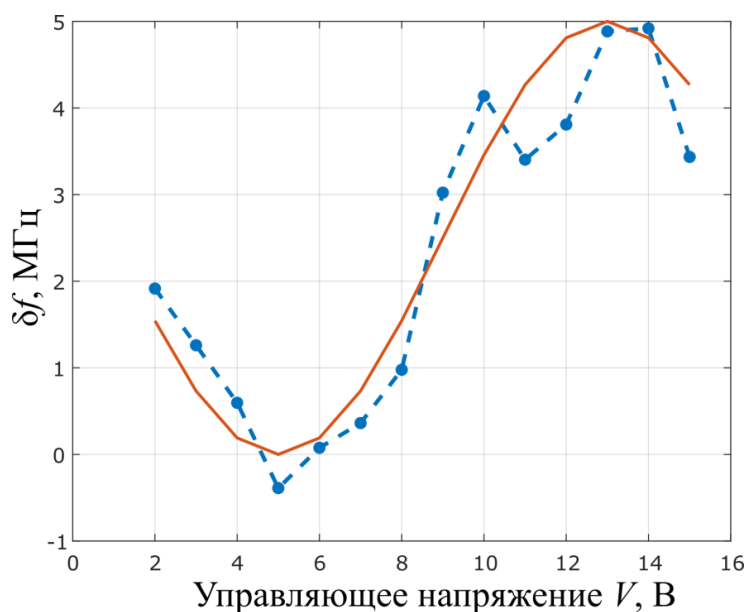


Рис. 3. Отклонение частоты ГУН на базе микросхемы JTOS-400+ от линейного закона: синяя линия – отклонение частоты; красная линия – аппроксимация модуляционных искажений гармонической функцией при $n = 1$

Возьмем период модуляции ЛЧМ сигнала $T_m = 1$ мс. При этих исходных данных из (17) получаем, что нелинейность перестройки частоты составит

$$\frac{|\Delta\gamma_{\max}|}{\gamma_0} = 2\pi n \frac{\delta f_{\max}}{\Delta F} = 8,7\% .$$

Если требуемая глубина зондирования $R = 2$ м, то погрешность оценки глубины согласно (14) и (17) составит

$$\delta R = 2\pi n^2 \frac{B_{\text{ПМ}}}{D} R = 2\pi n \frac{\delta f_{\max}}{\Delta F} R, \quad (18)$$

откуда находим $\delta R = 17,4$ см.

Как следует из (15), разрешающая способность зондирующего сигнала в воздухе ($\epsilon = 1$) равна

$$\Delta R = \frac{c}{2\Delta F} = 83 \text{ см.}$$

Таким образом, погрешность оценки глубины δR почти в 4,8 раза меньше разрешающей способности зондирующего сигнала в воздухе.

Если же взять модель грунта с диэлектрической проницаемостью $\text{Re}\sqrt{\epsilon} = 2$, тогда согласно (15) получим

$$\Delta R = \frac{c}{2\Delta F \text{Re}\sqrt{\epsilon}} = 41,5 \text{ см,}$$

т.е. погрешность δR почти в 2,4 раза меньше разрешающей способности зондирующего сигнала в данном грунте. Такая погрешность является предельно допустимой.

Заключение

В данной работе показано, что для георадара подповерхностного зондирования с частотной модуляцией существуют жесткие ограничения на допустимую нелинейность перестройки частоты в полосе зондирующего сигнала. Отклонение от линейного закона перестройки частоты может привести к недопустимо большим погрешностям определения глубины залегания искомых объектов. Дана методика расчета допустимой нелинейности

модуляционной характеристики ЧМ генератора при заданных основных технических характеристиках георадара и ожидаемой диэлектрической проницаемости грунта.

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Министерства культуры, образования, науки и спорта Монголии в рамках научного проекта № 19-57-44001

Литература

1. Daniels D.J. *Ground Penetrating Radar*. The Institution of Engineering and Technology. 2004. 752 p.
2. Баскаков А.И., Одсурэн Б., Комаров А.А., Тувдендоорж Г. Энергетические характеристики георадара на беспилотном носителе для поиска водоносного слоя в засушливых районах. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.7.10>
3. *Документация на микросхему JTOS-400+ компании Mini-Circuits*. [электронный ресурс]. Дата обращения: 19.04.2022. URL: www.elmechanics.com/documents/pdf/168/JTOS-400.pdf

Для цитирования:

Баскаков А.И., Комаров А.А., Михайлов М.С., Кожевников К.Ю. Оценка погрешности георадара из-за нелинейности ЛЧМ генератора, управляемого напряжением. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.4.1>