

09;12

Оптимизация компрессии частотно-модулированных импульсов в секционированном волноводе с винтовой гофрировкой поверхности

© С.В. Мишакин, С.В. Самсонов

Институт прикладной физики РАН,
603950 Нижний Новгород, Россия
e-mail: mishakin2006@rambler.ru

(Поступило в Редакцию 15 декабря 2008 г.)

Рассмотрен метод существенного (в 20–30 раз) повышения пиковой мощности: частотно-модулированных СВЧ-импульсов за счет пассивной компрессии при использовании в качестве диспергирующей среды волновода с винтовой гофрировкой поверхности. Показано, что секционирование волновода-компрессора, т.е. его разделение на несколько последовательно соединенных между собой секций со слегка отличающимися параметрами, существенно расширяет возможности подстройки дисперсионной характеристики системы под заданный закон частотной модуляции входного импульса. Сформулирован алгоритм подбора оптимальных параметров секций и на нескольких примерах показана высокая эффективность предлагаемого метода.

PACS: 41.20.Jb

Введение

Повышение пиковой мощности СВЧ-излучения традиционно является одной из центральных задач релятивистской электроники. Благодаря активным исследованиям в этой области генераторы сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн с мощностью порядка 1 GW становятся доступными для ряда уникальных приложений [1]. Значительный интерес в этой области представляют исследования, направленные на повышение пиковой мощности, не связанные с прямым увеличением энергии частиц и тока электронного пучка [2–6]. В частности, в работах [7,8] был предложен и исследован метод получения мультигигаваттной мощности излучения, основанный на пассивной компрессии частотно-модулированного СВЧ-импульса в круглом волноводе с периодической винтовой гофрировкой стенки. В качестве потенциального источника мощного частотно-модулированного излучения рассматривалась умеренно-релятивистская лампа обратной волны (ЛОВ) с изменяющейся во времени энергией частиц электронного пучка.

В настоящей работе обсуждается одна из возможностей совершенствования указанного метода, состоящая в секционировании волновода-компрессора (разбиения его по длине на несколько секций, отличающихся друг от друга параметрами гофрировки) и обеспечении тем самым эффективной компрессии импульсов с очень широким классом законов частотной модуляции.

Рассматривается компрессия (сжатие импульса по длительности и соответствующее увеличение по амплитуде) „классического“ типа, возникающая при распространении в диспергирующей среде квазимонохрома-

тического волнового пакета с плавной и монотонной частотной модуляцией [9–11]. Модуляция импульса и дисперсия среды должны быть подобраны таким образом, чтобы передняя часть импульса распространялась с меньшей групповой скоростью, чем его задняя часть. Хорошо известно, что при этом максимальный коэффициент компрессии по мощности для среды без потерь примерно равен произведению длительности входного импульса на интервал частотной модуляции (см., например, [10]) и достигается на оптимальной длине при вполне определенном согласовании законов частотной модуляции входного импульса и дисперсии среды [7,10]. В случае использования в качестве источника входного сигнала мощной ЛОВ с ускоряющим напряжением в несколько сотен киловольт возможности точной подстройки закона частотной модуляции ее выходного импульса под заданную дисперсионную характеристику волновода-компрессора весьма ограничены. Поэтому в данной ситуации наиболее перспективной представляется оптимизация компрессии за счет модификации волновода-компрессора. Как отмечалось в работах [7,8], одним из преимуществ волновода с винтовой гофрировкой является существенно большая „гибкость“ и управляемость дисперсии его рабочей волны, чем у гладкого волновода. Однако несмотря на это дисперсию винтового волновода удастся эффективно согласовать далеко не с каждым законом частотной модуляции входного импульса. Предлагаемое секционирование позволяет существенно расширить класс „подходящих“ для компрессии импульсов и тем самым расширить диапазон эффективного использования винтовых волноводов-компрессоров.

1. Оптимальные условия компрессии частотно-модулированных импульсов

При анализе эволюции волнового пакета с плавной (в масштабе периода высокочастотного заполнения) амплитудной и частотной модуляцией в волноводе с винтовой гофрировкой, так же как и в работах [7,8], будем предполагать, что электромагнитная энергия внутри волновода (или его отдельной секции с постоянными по длине параметрами гофрировки) распространяется в виде одной из его нормальных волн $\exp[-i(\omega t - h_c z)]$, где ω — циклическая частота,

$$h_c(\omega) = h - i\gamma, \quad (1)$$

— продольное волновое число, действительная часть которого h существенно превышает ответственную за потери мнимую часть γ . В этом случае, так же как и для плоской волны (см., например, [11]), связь между сигналами (соответствующими компонентами электромагнитного поля) U и U_0 в сечениях, разделенных отрезком волновода длины z , определяется соотношением

$$U(z, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_0(\omega) \exp(ih_c(\omega)z) \exp(-i\omega t) d\omega, \quad (2)$$

где

$$S_0(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} U_0(t) \exp(i\omega t) dt = |S_0(\omega)| \exp(i\varphi(\omega)) \quad (3)$$

— спектр входного сигнала.

Введем дополнительные обозначения и ограничения, соответствующие рассматриваемым здесь случаям. Для входного квазимонохроматического импульса

$$U_0(t) = U_{\text{env}}(t) e^{-i\psi(t)}$$

мгновенная частота заполнения $\omega_{\text{mod}}(t) = d\psi(t)/dt$ предполагается плавной ($|d\omega_{\text{mod}}/dt| \ll \omega_{\text{mod}}^2$) и монотонной функцией, а огибающая $U_{\text{env}}(t)$ — функцией, близкой по форме к прямоугольнику, длительностью τ_0 с плавными в масштабе несущих колебаний фронтами. Диапазон частотной модуляции определим как

$$\Delta\omega = |\omega_2 - \omega_1|,$$

где $\omega_1 = \omega_{\text{mod}}(0)$, $\omega_2 = \omega_{\text{mod}}(\tau_0)$.

Исходя из общих соотношений, справедливых для фурье-преобразований, и учитывая сделанные предположения, можно утверждать, что минимальная длительность выходного сигнала, и следовательно, максимальная компрессия в точке $z = L$ будет достигаться при условии линейной зависимости фазы комплексной функции $S_0(\omega) \exp(ih(\omega)L)$, входящий в интеграл Фурье (2), от частоты, т. е.

$$\frac{d}{d\omega} (\varphi(\omega) + h(\omega)L) = \text{const}. \quad (5)$$

На основе метода стационарной фазы можно показать, что в рассматриваемом приближении производная от фазы спектра входного сигнала определяется выражением:

$$\frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} = t_{\text{mod}}(\omega), \quad (6)$$

где $t_{\text{mod}}(\omega)$ — функция, обратная $\omega_{\text{mod}}(t)$. Таким образом, условие (5) может быть записано в виде:

$$t_{\text{mod}}(\omega) + D(\omega)L = \text{const}, \quad (7)$$

где $D(\omega) = dh/d\omega = 1/v_{\text{gr}}(\omega)$, величина, обратная групповой скорости рабочей волны v_{gr} , для краткости называемая далее дисперсионной характеристикой. Постоянная величина const и оптимальная длина L , входящие в (5), (7), определяются крайними точками законов частотной модуляции входного импульса и дисперсии волны в соответствии со следующими выражениями:

$$t_{\text{mod}}(\omega_1) = 0, \quad t_{\text{mod}}(\omega_2) = \tau_0, \quad (8.1)$$

$$v_{\text{gr}}(\omega_1) = v_1, \quad v_{\text{gr}}(\omega_2) = v_2. \quad (8.2)$$

Полученное условие (7) оптимального согласования частотно-модулированного импульса с диспергирующей средой имеет достаточно прозрачную физическую интерпретацию. Действительно, в рамках сделанных ограничений импульс на входе в среду можно представить в виде непрерывной цепочки „частиц“, обладающих скоростями $v_{\text{gr}}(\omega)$, соответствующими дисперсии среды и временами влета $t_{\text{mod}}(\omega)$, соответствующими частотной модуляции. Очевидно, что все такие „частицы“ встретятся друг с другом в одной точке $z = L$, если суммы времени их пролета через среду $L/v_{\text{gr}}(\omega)$ и времени задержки влета $t_{\text{mod}}(\omega)$ будут одинаковы. В этом случае реализуются минимальная длительность выходного сигнала и соответствующий ей максимальный коэффициент компрессии по мощности, которые (в пренебрежении потерями) с приемлемой точностью определяются выражениями [7,10]:

$$\tau_{\text{min}} \approx \frac{2\pi}{\Delta\omega}, \quad K_{\text{max}} \approx \frac{\Delta\omega}{2\pi} \tau_0. \quad (9)$$

Рассмотрим особенности и оптимальные условия компрессии импульсов, характерные для волноводов с винтовой гофрировкой [7,8]. Параметры гофрировки в случае волновода-компрессора выбираются таким образом, чтобы в рабочей области частот обеспечить эффективную связь двух парциальных мод гладкого волновода. В этой области дисперсионная характеристика нормальной волны плавно трансформируется от одной парциальной моды к другой (рис. 1).

Если групповые скорости мод сильно отличаются друг от друга (одна волна — бегущая, а другая близка к критической), то групповая скорость нормальной волны сильно зависит от частоты, что и необходимо для реализации компрессора. Использование винтовой гофрировки и циркулярно-поляризованных рабочих волн позволяет избежать частотных областей с нулевой и отрицательной групповой скоростью нормальной волны (в отличие

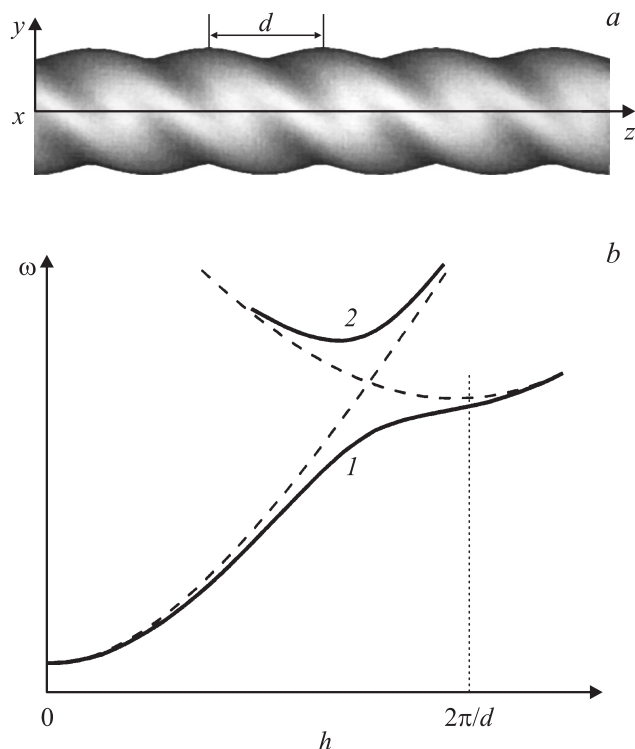


Рис. 1. Волновод с винтовой гофрировкой поверхности (а) и дисперсионная диаграмма его мод (b): пунктир — рабочая пара парциальных мод, 1 — рабочая нормальная волна компрессора, 2 — паразитная нормальная волна компрессора.

от аксиально-симметричного гофрированного волновода, в котором сильная дисперсия нормальных волн, кроме квазикритических частот, проявляется также вблизи брэгговских полос запыриания). Это важное свойство винтового волновода обеспечивает малые отражения от компрессора в достаточно широкой полосе частот. Анализ, выполненный в работах [7,8], показал, что наиболее перспективные для получения сверхмощных микроволновых импульсов комбинации источника входного импульса с винтовым волноводом-компрессором характеризуются следующими параметрами: $\Delta\omega/\omega_{\text{mod}} = 0.04\text{--}0.07$, $\omega_{\text{mod}}\tau_0 = (2\text{--}5) \cdot 10^3$, $v_1/c = 0.1\text{--}0.15$, $v_2/c = 0.5\text{--}0.6$, $\omega_{\text{mod}}L/c = (0.4\text{--}1) \cdot 10^3$, $K_{\text{max}} = 10\text{--}30$.

Проиллюстрируем проблему согласования закона частотной модуляции входного импульса и дисперсии винтового волновода на примере системы, спроектированной для компрессии СВЧ-импульсов гигаваттного уровня мощности трехсантиметрового диапазона длин волн [8]. В данном случае пятизаходная винтовая гофрировка поверхности волновода эффективно связывает между собой квазикритическую $TE_{2,2}$ и бегущую $TE_{3,1}$ моды противоположного вращения (рис. 2) в области частот 9.5–10.4 GHz. Дисперсия рабочей волны такова, что волновод может использоваться для компрессии импульсов как с убывающей (от 10 до 9.5 GHz) так и растущей (от 10 до 10.4 GHz) во времени частотой. Ограничения рабочего диапазона частот в данном случае

определяются существенным возрастанием паразитного рассеяния в другие волноводные моды на краях частотного диапазона.

Рассмотрим случай спадающей во времени частоты заполнения входного импульса и выберем его длительность равной $\tau_0 = 60$ ns, что в соответствии с (9) должно обеспечить достаточно высокий коэффициент компрессии $K_{\text{max}} \approx 30$. Закон частотной модуляции импульса зададим в соответствии с (7)–(8), где $D(\omega)$ — вычисленная дисперсионная характеристика рабочей волны для данного волновода (соответствующие сплошные линии на рис. 3, а, b). Как показывает расчет с использованием численного конечно-разностного интегрирования выражений (2), (3), найденный из (7) закон частотной модуляции действительно обеспечивает коэффициент компрессии, близкий к максимально достижимому. В данном случае он составляет 27.5 (с учетом омических потерь) и достигается на длине $L = 2.6$ m (рис. 3, с).

Как было отмечено во Введении, в ряде практически важных случаев возможности обеспечения заданного

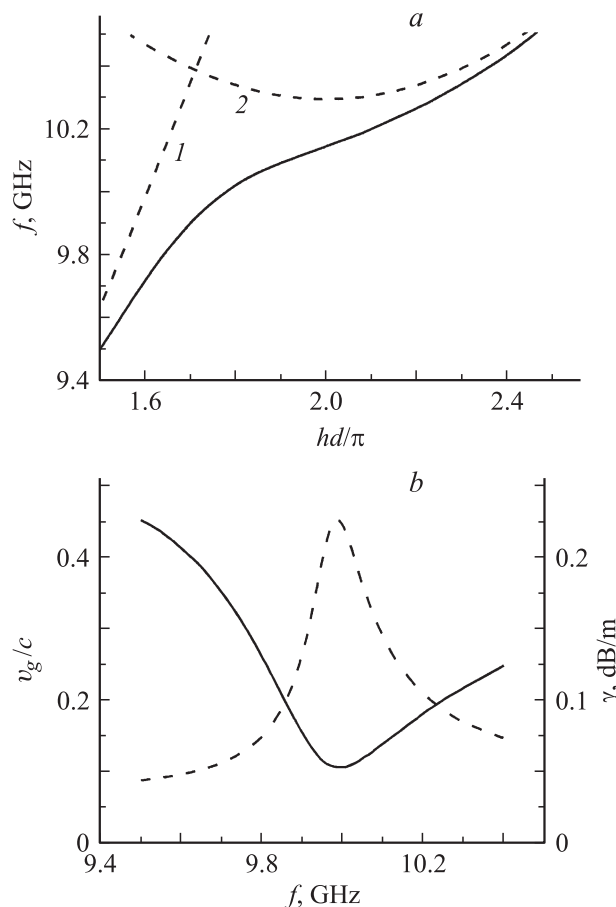


Рис. 2. Расчетные характеристики винтового волновода: а — дисперсионная диаграмма парциальных мод: 1 — $TE_{3,1}$, 2 — пространственная гармоника $TE_{2,2}$ (пунктир) и нормальной рабочей волны (сплошная линия); б — зависимость от частоты групповой скорости (сплошная линия) и омических потерь (пунктир) рабочей волны.

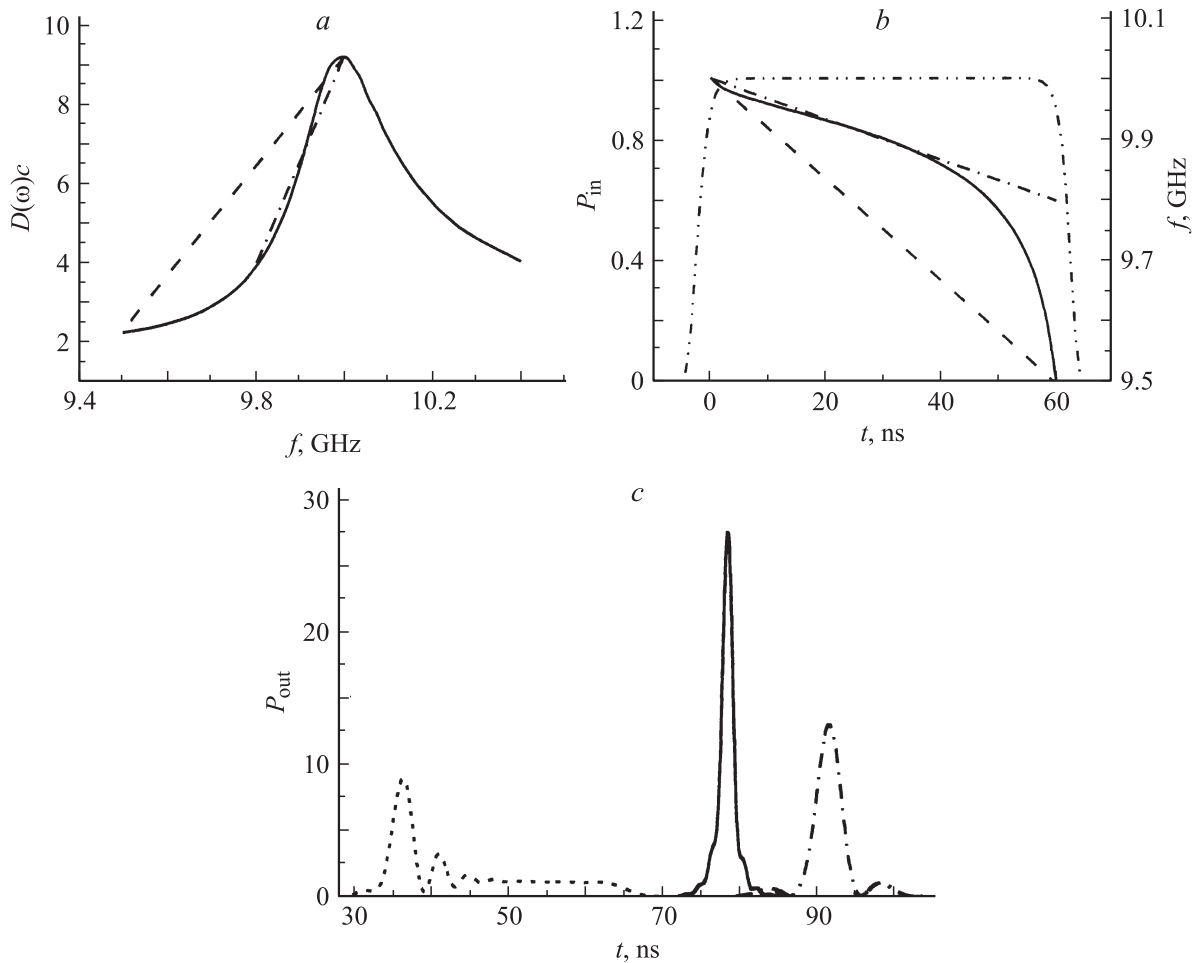


Рис. 3. Иллюстрация проблемы согласования дисперсии рабочей волны винтового волновода и закона частотной модуляции входного импульса: *a* — реальная дисперсионная характеристика (сплошная линия), идеальные характеристики для компрессии импульсов с линейной частотной модуляцией (пунктир и штрихпунктир); *b* — зависимости от времени мощности входного импульса (штрихпунктир с двумя точками) и частоты его заполнения при оптимальном (сплошная линия) и линейном (пунктир и штрихпунктир) законах модуляции; *c* — результаты расчета компрессии импульсов с оптимальным (сплошная линия) и линейным законами частотной модуляции (пунктир для модуляции от 10 до 9.5 GHz, штрихпунктир — от 10 до 9.8 GHz).

закона частотной модуляции могут быть весьма ограничены. На выбранном примере винтового волновода-компрессора покажем, насколько существенно повлияет на коэффициент компрессии отличие частотной модуляции входного импульса от оптимального закона. Для примера рассмотрим аналогичный входной импульс, но с линейно убывающей во времени заполнением (пунктир рис. 3, *b*). Используя для расчетов выражения (2), (3), находим, что максимальная компрессия при этом достигается на меньшей длине (1.45 м), а коэффициент увеличения мощности оказывается почти в 3 раза меньше по сравнению с оптимальным случаем (рис. 3, *c*).

Коэффициент компрессии можно несколько увеличить, выбрав более узкий интервал частотной модуляции, соответствующий „наиболее линейному“ участку дисперсионной характеристики, а именно 9.8–10 GHz (штрихпунктир на рис. 3, *a, b*). При этом относительная пиковая мощность достигает величины 12.5 (рис. 3, *c*),

определяемой произведением длительности импульса на интервал частотной модуляции (9). Очевидно, что из-за вынужденного сужения частотного интервала коэффициент компрессии оказывается более чем в 2 раза ниже максимально достижимой для данной ситуации величины. Рассмотренный пример показывает, что несмотря на сравнительно узкий рабочий интервал частот оптимальное согласование дисперсионной характеристики среды и закона частотной модуляции входного импульса играет очень важную роль для достижения максимального возможного коэффициента компрессии.

2. Секционирование волновода-компрессора

Покажем, каким образом указанную выше проблему согласования можно решить не за счет точного задания частотной модуляции входного импульса, а за счет

подстройки дисперсионной характеристики компрессора под заданный закон $\omega_{\text{mod}}(t)$. Сразу отметим, что при использовании одной секции винтового волновода с регулярной по длине гофрировкой возможности такой подстройки весьма ограничены. Дело в том, что при изменении параметров гофрировки (глубины, периода, среднего радиуса) качественный вид дисперсионной характеристики рабочей волны существенно не изменяется, хотя ее отдельные параметры, например минимальная величина групповой скорости, могут изменяться существенно (в несколько раз). Интервал рабочих частот остается сравнительно узким (не более 5% по обе стороны от частоты, где значение $v_{\text{гр}}$ минимально), и внутри этого интервала вторая производная дисперсионной характеристики $D(\omega)$, во-первых, достигает достаточно большой величины и, во-вторых, претерпевает две смены знака (см. рис. 3, а). Такая сильная „изогнутость“ $D(\omega)$, как правило, существенно сужает область частот, где возможна эффективная подстройка дисперсии под заданный закон $\omega_{\text{mod}}(t)$. Так, например, в случае линейной частотной модуляции эта область сужается до 2–2.5%, что при ограниченной длительности входного сигнала не позволяет реализовать высокие значения коэффициента компрессии. Однако этот же недостаток (знакопеременность второй и первой производных $D(\omega)$ одной секции волновода с регулярной гофрировкой) можно обратить в преимущество и использовать для эффективного синтеза дисперсионной характеристики системы, состоящей из нескольких последовательно соединенных между собой секций винтового волновода, отличающихся друг от друга параметрами гофрировки.

Если пренебречь эффектами, возникающими на относительно коротких переходных областях между секциями, то полный набег фазы рабочей волны, проходящей через секционированный волновод Φ_{Σ} , очевидно, будет равен сумме набегов фаз, соответствующих каждой секции:

$$\Phi_{\Sigma} = \sum_{j=1}^{N_s} h_j L_j,$$

где h_j — продольное волновое число, характеризующее j -ю секцию, L_j — ее длина, N_s — число секций. Соответственно дисперсионную характеристику многосекционного компрессора можно представить в виде:

$$D_{\Sigma}(\omega) = \sum_{j=1}^{N_s} \beta_j D_j(\omega),$$

где $D_j(\omega) = dh_j(\omega)/d\omega$ — дисперсионные характеристики, а $\beta_j = L_j/L$ — относительные длины секций, удовлетворяющие условию

$$\sum_{j=1}^{N_s} \beta_j = 1.$$

В данном случае отмеченная выше сильная „изогнутость“ типичной характеристики $D_j(\omega)$ и наличие весовых коэффициентов β_j определяют достаточно широкие возможности синтеза оптимальной дисперсионной характеристики компрессора (7) для большого класса законов частотной модуляции входного импульса. Учитывая, что характерные изменения индивидуальной дисперсионной характеристики происходят в узком интервале частот, можно утверждать, что достаточно эффективным для синтеза произвольных зависимостей $D_{\Sigma}(\omega)$ может являться набор $D_j(\omega)$ отличающихся друг от друга лишь небольшим (в пределах нескольких процентов) смещением по частоте. Такого смещения в случае винтовых волноводов можно добиться при изменении любого из трех параметров гофрировки — среднего радиуса, глубины и периода. Однако наиболее простым с точки зрения расчетов является масштабирование (т.е. умножение на один и тот же коэффициент) одновременно всех перечисленных параметров геометрии волновода.

Обозначим масштабный коэффициент j -й секции относительно первой секции волновода как α_j , тогда

$$D_j(\omega) = D_1(\alpha_j \omega). \quad (10)$$

Таким образом, задача синтеза заданной зависимости $D_{\Sigma}(\omega)$ сводится к поиску соответствующего дискретного набора коэффициентов α_j и β_j . Покажем на конкретных примерах, каким образом удастся согласовать дисперсию секционированного волновода-компрессора с входными импульсами, имеющими различные типы частотной модуляции.

3. Компрессия импульсов в секционированных винтовых волноводах

В разд. 1 был приведен важный с практической точки зрения пример компрессии (рис. 3), иллюстрирующий недостаточную эффективность использования одной секции винтового волновода в случае сжатия импульса с линейно убывающей во времени частотой. Покажем, что в данном случае уже при использовании всего трех секций волновода коэффициент компрессии может быть существенно увеличен и приближен к своему максимально возможному значению (9).

Отметим, что во всех приведенных далее примерах число секций волновода выбрано равным трем ($N_s = 3$), а два из пяти оставшихся параметров синтеза, а именно α_2 и α_3 , задавались изначально исходя из качественного вида зависимостей $D_1(\omega)$ и $\omega_{\text{mod}}(t)$. Таким образом, синтез оптимальной характеристики $D_{\Sigma}(\omega)$ осуществлялся подбором относительных длин секций β_j . Такой подбор выполнялся с помощью численных методов и состоял в поиске минимума функции, равной среднему интегральному отклонению получаемой зависимости $D_{\Sigma}(\omega)$ от оптимальной, определяемой выражениями (7)–(8).

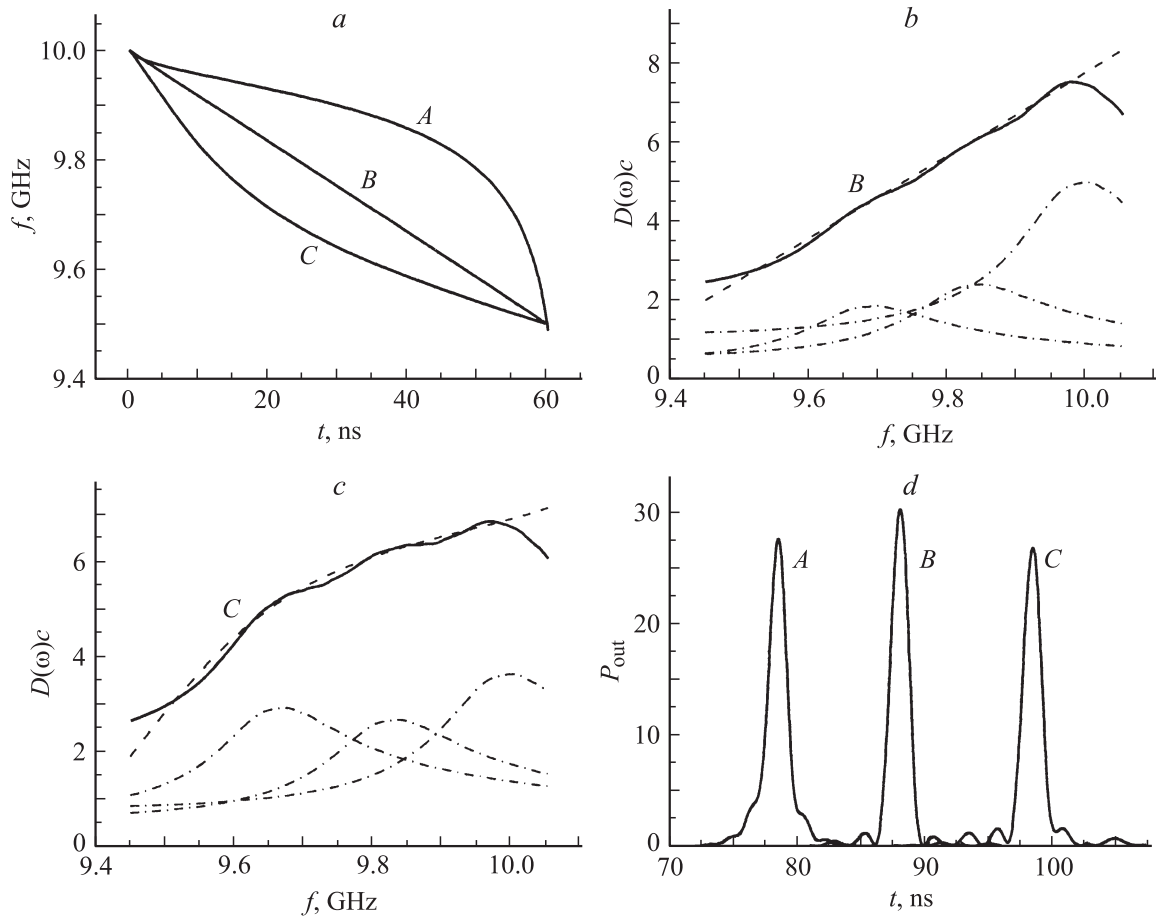


Рис. 4. Результаты оптимизации параметров секций волновода-компрессора для различных законов частотной модуляции (*a*) входного импульса с уменьшающейся во времени частотой (*A* — оптимальная для односекционного компрессора, *B* — линейная, *C* — нелинейная с характером нелинейности, противоположным оптимальному): *b* и *c* — дисперсионные характеристики компрессоров (пунктир — идеальная, сплошная линия — достигается в результате секционирования, штрихпунктир — характеристики отдельных секций, умноженные на соответствующие относительные длины), *d* — импульсы на выходе соответствующих компрессоров.

В случае частотной модуляции входного импульса с уменьшающейся от 10 до 9.5 GHz частотой масштабные коэффициенты секций компрессора были выбраны равными $\alpha = 1, 1.015, 1.031$. При этом для линейного закона частотной модуляции (линия *B* на рис. 4, *a*) найденный набор относительных длин секций, а именно $\beta = 0.54, 0.26, 0.20$, обеспечивает очень хорошую линейность суммарной дисперсионной характеристики в выбранном интервале частот (рис. 4, *b*), что в итоге приводит к возможности достижения коэффициента компрессии даже несколько большего, чем в случае оптимального закона частотной модуляции (кривая *A* на рис. 4, *a*) и использования одной секции волновода (ср. *A* и *B* на рис. 4, *d*) (табл. 1). Отметим, что результирующий импульс на выходе компрессора рассчитывался на основе численного интегрирования выражений (2), (3) с учетом заданной формы фронтов входного импульса (рис. 3, *b*) и омических потерь в волноводе, поэтому отличия в пиковой мощности на 10–15% для оптимизированных с помощью приближенной методики вариантов вполне

объяснимы и не являются принципиальными для рассматриваемых здесь возможных приложений.

Для дополнительной иллюстрации возможностей предлагаемого метода кроме линейного закона рассмотрен также случай некоторого произвольного закона частотной модуляции с характером нелинейности, существенно отличающимся от оптимального (ср. кривые *A* и *C* на рис. 4, *a*). В данном случае при тех же масштабных коэффициентах секций α_j найденный набор их относительных длин β_j (табл. 1) также обеспечивает достижение коэффициента компрессии, близкого к максимальному (рис. 4, *d*). Кроме параметров секций волнопроводов и рассчитанных величин относительной пиковой мощности выходных импульсов в табл. 1 приведены такие важные для компрессоров энергетические величины, как омический и общий коэффициенты полезного действия (КПД). Омический КПД в данном случае равен отношению значений полной энергии в импульсах на выходе и входе компрессора, а общий КПД определяется процентным содержанием доли входной

Таблица 1. Параметры компрессоров, обеспечивающие максимальную пиковую мощность при сжатии входных импульсов длительностью 60 ns с убывающей от 10 до 9.5 GHz во времени частотой заполнения

Закон модуляции частоты	Коэффициент компрессии	Омический КПД, %	Общий КПД, %	Число секций	Полная длина, m	Параметры секций
Оптимальный для односекционного компрессора (A на рис. 4, a)	27.5	84	70	1	2.6	$\alpha = 1$ $\beta = 1$
Линейный (B на рис. 4, a)	30.5	82	79	3	3.4	$\alpha = 1, 1.015, 1.031$ $\beta = 0.54, 0.26, 0.20$
Нелинейный (C на рис. 4, a)	27.0	83	73	3	4.3	$\alpha = 1, 1.015, 1.031$ $\beta = 0.39, 0.29, 0.32$

Таблица 2. Параметры компрессоров, обеспечивающие максимальную пиковую мощность при сжатии входных импульсов длительностью 60 ns с убывающей от 10 до 10.4 GHz во времени частотой заполнения

Закон модуляции частоты	Коэффициент компрессии	Омический КПД, %	Общий КПД, %	Число секций	Полная длина, m	Параметры секций
Оптимальный для односекционного компрессора (A на рис. 5, a)	25.0	82	77	1	3.5	$\alpha = 1$ $\beta = 1$
Линейный (B на рис. 5, a)	23.3	78	76	3	4.9	$\alpha = 1, 0.988, 0.976$ $\beta = 0.72, 0.16, 0.12$
Нелинейный (C на рис. 5, a)	20.8	75	67	3	5.5	$\alpha = 1, 0.988, 0.976$ $\beta = 0.65, 0.13, 0.22$

энергии в „полезном“ импульсе и кроме омических потерь характеризует неидеальность формы выходного импульса (идеальным импульсом здесь считается сигнал гауссообразной формы с шириной, равной ширине выходного импульса на уровне 1/2 от его максимума).

Аналогичные результаты приведены также для случая компрессии импульсов с растущей во времени частотой заполнения. При этом рабочий участок дисперсии волны винтового волновода занимает значения частоты от 10 до 10.4 GHz. В этом интервале частот задавалась модуляция входного импульса с качественно различными законами: оптимальным для одной секции волновода, линейным и произвольным (с характером нелинейности, противоположным оптимальному) (рис. 5, a). В данном случае масштабные коэффициенты секций были выбраны равными $\alpha = 1.000, 0.988, 0.976$. При этом так же, как и в приведенных примерах со спадающей во времени частотой, удается найти наборы относительных длин секций, обеспечивающие возможность реализации коэффициентов компрессии (рис. 5) (табл. 2), близких к максимально достижимому для заданного интервала частот (0.4 GHz) и длительностью входного импульса (60 ns).

Использованная здесь методика оптимизации параметров секций волновода-компрессора не является строгой,

а ее результаты не являются однозначными. Вместе с тем предложенный подход достаточно прост в использовании, а его высокая эффективность продемонстрирована на ряде важных с практической точки зрения примеров. Отличия геометрических размеров секций друг от друга в приведенных примерах не превышают 3%. Как показывает трехмерное компьютерное моделирование, при столь малом отличии даже очень короткие переходные секции (на которых параметры сечения плавно меняются) длиной около половины периода гофрировки обеспечивают практически полную трансформацию энергии, содержащейся в рабочей волне одной секции, в энергию рабочей волны другой секции.

Продемонстрированная в настоящей работе возможность синтеза оптимальной дисперсионной характеристики компрессора, состоящего из нескольких секций винтового волновода, имеет принципиальные ограничения в случаях использования для компрессии гладких волноводов или волноводов с осесимметричной периодической гофрировкой. Действительно, закон дисперсии волн цилиндрического волновода обеспечивает возможность компрессии частотно-модулированных сигналов с растущей во времени частотой, а осесимметричная гофрировка дает дополнительную возможность компрессии импульсов и с убывающей частотой при работе

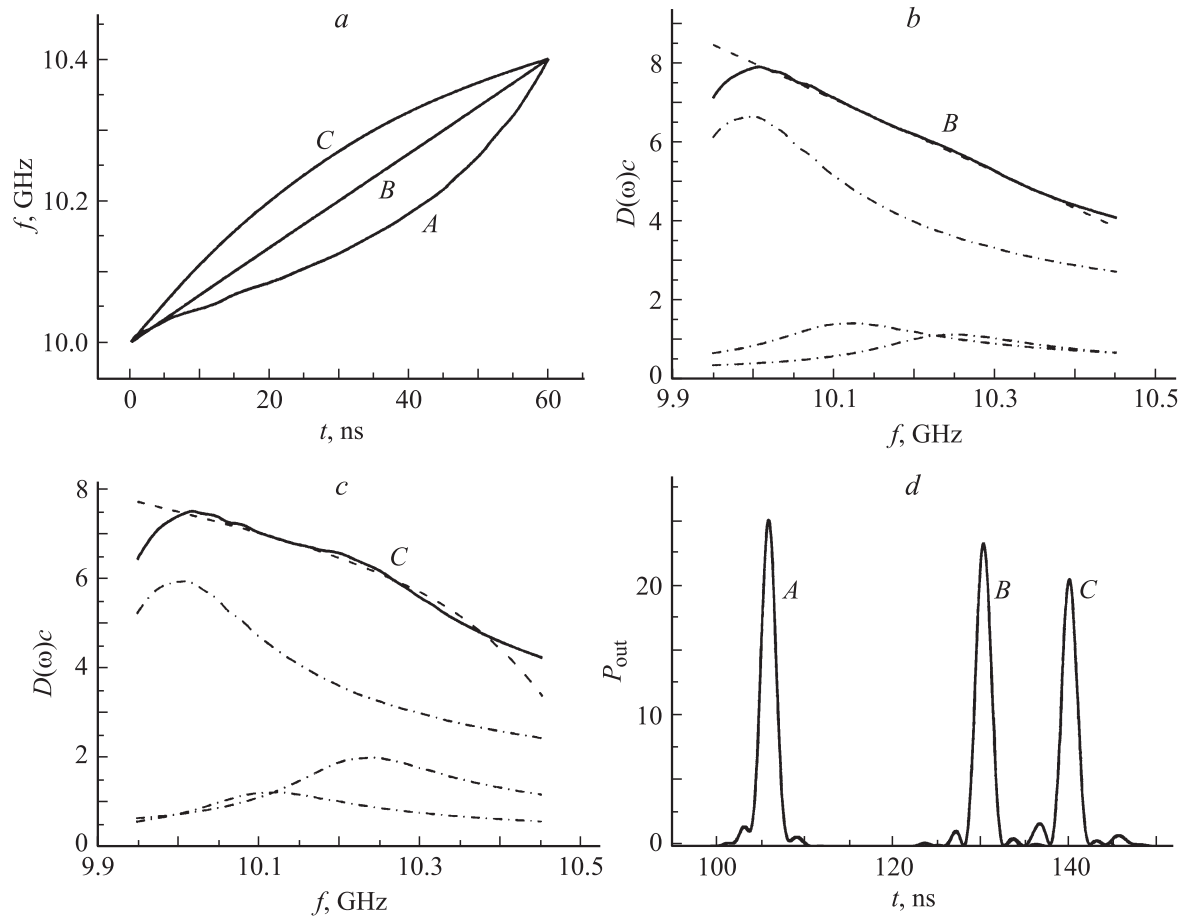


Рис. 5. Результаты оптимизации параметров секций волновода-компрессора для различных законов частотной модуляции (а) входного импульса с растущей во времени частотой: *b-d* аналогичны результатам, показанным на рис. 4.

вблизи брэгговской зоны непрозрачности. Однако неизбежное обращение в нуль групповой скорости волны на соответствующей частоте отсекает (а не плавный ее переход через минимальное значение, как для рабочей нормальной волны винтового волновода) и связанное с этим постоянство знака второй производной дисперсионной характеристики существенно ограничивает, а в ряде случаев делает невозможным синтез заданной дисперсии даже при использовании многосекционной системы.

Заключение

Пассивная компрессия частотно-модулированных импульсов, генерируемых мощными микроволновыми генераторами, такими, например, как релятивистская ЛОВ, является одним из перспективных методов существенного (на порядок) увеличения их пиковой мощности. Показано, что СВЧ-компрессоры в виде нескольких последовательно соединенных между собой секций волноводов с винтовой гофрировкой позволяют эффективно компрессировать импульсы с широким классом законов частотной модуляции. Приведен достаточно про-

стой алгоритм синтеза параметров многосекционного волновода-компрессора для заданного закона частотной модуляции входного импульса. Высокая эффективность предлагаемого метода продемонстрирована на нескольких важных с практической точки зрения примерах.

Авторы благодарны В.Л. Братману и Г.Г. Денисову за полезные обсуждения данной работы.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 07-08-00244) и Комплексной программой президиума РАН „Фундаментальные проблемы релятивистской импульсной и стационарной электроники большой мощности“ (подпрограмма 1).

Список литературы

- [1] *Application of High-Power Microwaves* // Ed. by A.V. Gapov-Grekov, V.L. Granatstein. Norwood, MA; Artech House, 1994. 364 p.
- [2] Ginzburg N.S., Novozhilova N.Yu., Zotova I.V., Sergeev A.S., Peskov N.Yu., Phelps A.D.R., Wiggins S.M., Cross A.W., Ronald K., He W., Shpak V.G., Yalandin M.I., Shunailov S.A., Ulmaskulov M.R., Tarakanov V.P. // Phys. Rev. E. 199. Vol. 60. P. 3297.

- [3] *Eltchaninov A.A., Koroniv S.D., Mesyats G.A., Pegel I.V., Rostov V.V., Shpak V.G., Yalandin M.I.* // IEEE Transactions on Plasma Sci. 2004. Vol. 32. N 3. P. 1093.
- [4] *Petelin M.I.* // Proc. of the Int. Workshop „Strong Microwaves in Plasmas“. Nizhny Novgorod, Russia, 1996. P. 903.
- [5] *Артеменко С.Н., Августинович В.А., Юшков Ю.Г.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. 43. № 10. С. 917.
- [6] *Манько А.Н., Слинко В.Н., Чумерин П.Ю., Юшков Ю.Г.* // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 3. С. 106.
- [7] *Samsonov S.V., Phelps A.D.R., Bratman V.L., Burt G., Denisov G.G., Cross A.W., Ronald K., He W., Yin H.* // Phys. Rev. Lett. 2004. Vol. 92. P. 18 301.
- [8] *Братман В.Л., Денисов Г.Г., Самсонов С.В., Кросс А.У., Рональд К., Фелс А.Д.Р.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50. № 1. С. 40.
- [9] *Bromley R.A., Callan B.E.* // Proc. IEEE. 1967. Vol. 114. P. 1213.
- [10] *Ширман Я.Д.* Разрешение и сжатие сигналов. М.: Сов. радио, 1974. 360 с.
- [11] *Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С.* Оптика фемто-секундных лазерных импульсов. М.: Наука, 1988. 310 с.