

ПРИНЦИПЪТ НА ИНВАРИАНТНОСТТА ЗА КОМПЕНСАЦИЯ НА НЕЛИНЕЙНИЯ ЕФЕКТ ПРИ ПРЕДАВАНЕ НА СИГНАЛИ

Антонио Андонов, Мариана Михова, Петър Димкин

ВТУ “Т. Каблешков”
e-mail: andonov@vtu.bg; marianndimi@abv.bg; p_dimkin@abv.bg

Ключови думи: инвариантност, шумоустойчивост, нелинейност, комуникационни канали.

Резюме: Целта на предложената работа е добре разработените методи в теорията на инвариантността, ориентирани към системи за управление, да бъдат приложени и в комуникационната теория. Обосновават се и се развиват общи подходи за синтез на широк клас комуникационни канали с контролируеми нелинейни свойства, базирани на фундаменталния принцип на инвариантността. Въвеждат и се обосновават два подхода: единият, основан на принципа на сигналната инвариантност, реализиран чрез използване на широколентови шумоподобни сигнали и вторият, основан на параметрическата инвариантност, предполагащ независимост на координатите от параметрите на звената, формиращи комуникационния канал.

PRINCIPLE OF INVARIANCE FOR THE COMPENSATION OF NONLINEAR EFFECTS IN THE SIGNALS TRANSMISSION

Antonio Andonov, Mariana Mihova, Petar Dimkin

University of Transport Todor Kableshkov
e-mail: andonov@vtu.bg; marianna_mihova@abv.bg; p_dimkin@abv.bg

Keywords: invariance, noise stability, nonlinearity, communication channels.

Abstract: The proposed work is well developed methods of invariance theory, oriented to management systems, to be applied in communication theory. Justifying and developing common approaches for the synthesis of a wide class of communication channels with controllable nonlinear properties based on the fundamental principle of invariance. Introduced and justified are two approaches: one based on the principle of invariance signal generated by the use of broadband signals with spread spectrum and the second based on parametric invariance, implying independence of the coordinates of the parameters of the units forming the communication channel.

Проблемът за инвариантността е широко разработен в теорията на автоматичното управление. Там под инвариантност се разбира свойството на системата да се противопоставя на произволни смущения, като напълно или частично ги компенсира. Това е възможно, тъй като в системите за управление управляващите въздействия и смущенията са пространствено разделени и те могат да бъдат оценявани поотделно. В комуникациите това е принципно невъзможно, тъй като полезният сигнал и смущенията въздействат в една и съща точка на приемане, като формират сместа сигнал – шум. Ако това не беше така, то и проблемът за шумоустойчивостта на комуникационните системи не би съществувал. Независимо от това фундаменталният принцип за инвариантността, както ще бъде показано по – долу, може да се използва за компенсиране на нелинейните ефекти в предавателния тракт на радиокомуникационни системи.

В теорията на автоматичното управление се доказва, че принципът на инвариантността се основава на физическата компенсация на въздействащото смущение. За случай на въздействие на едно смущение да разгледаме системата с изходна величина $y(t)$ и смущаващото въздействие $f(t)$, за които е изпълнено:

$$(1) \quad y(t) = K_0(p)f(t)$$

$$(2) \quad K_0(p) = K_1(p) - K_2(p),$$

където $K_1(p)$ и $K_2(p)$ са линейни коефициенти на предаване на съответните канали.

Това условие трябва да е изпълнено в тази честотна лента, където енергията $f(t)$ на изхода на системата е пренебрежимо малка.

Ако в синтезирания канал се включи нелинейно звено с оператор на предаване "вход – изход" $z = L[x_a]$, тогава изходната координата може да се представи като състояща се от две съставящи:

$$(3) \quad z(t) = K(p) + F(t),$$

където $K(p)$ е оператор на линейно предаване на звеното, а $x_a(t)$ е входна величина на нелинейното звено.

Съгласно принципа на инвариантността, за да няма нелинеен ефект на изхода на радиоканала, трябва да бъде изпълнено условието:

$$(4) \quad y = \text{invar } f(t) \text{ при } F(S) = 0,$$

където F е допълнителна система уравнения за вектора на параметрите S на синтезирания канал, които трябва да удовлетворяват условията за устойчивост и физическа реализуемост.

Възможни са два вида общи методи за защита на канала от нелинейни свойства: едните изключват появата на $f(t)$ на изхода на канала, макар че в изходната координата на нелинейното звено $f(t) \neq 0$, а другите изключват появата на $f(t)$ на изхода на нелинейното звено. Вторият метод се състои в ограничаване на входното ниво на сигнала за нелинейното звено:

$$(5) \quad \|x_a(t)\| \leq E_0,$$

където E_0 е праг на смущенията на нелинейното звено, превишаването на който води до поява на нелинейни ефекти. Подобна защита на входа на нелинейното звено може да се осъществи чрез линеен пасивен атенюатор, селективна верига, ограничаваща нивото на загубите и т.н.

Появата на $f(t)$ на изхода на канала може да бъде изключена или ограничена чрез използване на принципа на двуканалността. При тази задача обаче смущението $f(t)$ в координатата $z(t)$ не принадлежи на автономния източник, а големината и характерът му зависят от входното за нелинейното звено въздействие $x_a(t)$, което изисква да се осъществи допълнителна операция по отделянето на $f(t)$. Условието за линейност на операторите на двата канала $K_1(p)$ и $K_2(p)$ в синтезираната структура могат да не се изпълняват строго, което изисква контрол на линейността на тези канали. В много случаи е необходимо да се отчитат техните шумове, нестабилност и др.

Определянето на $f(t)$ може да стане чрез отделяне от входното линейно въздействие $b(p)x(p)$ на координата $z(t)$ със съответния коефициент на предаване β . Тогава:

$$(6) \quad \varepsilon(t) = b(p)x(t) - \beta(p)z(t) = A(p)x(t) - \beta(p)f(t),$$

където:

$$(7) \quad A(p) = b(p) - \beta(p)a(p)K(p),$$

като $a(p)$ – коефициент на предаване от входа на канала до входа на нелинейното звено, т. е.:

$$(8) \quad x_a(t) = a(p)x(t)$$

Вижда се, че $\varepsilon(t)$ се състои от две съставящи: преобразувания линеен сигнал $A(p)x(t)$ и трансформираната съставяща на изкривяванията $\beta(p)f(t)$.

При $A(p) \equiv 0$ се получава:

$$(9) \quad \varepsilon(t) = -\beta(p)f(t),$$

което съдържа информация за нелинейния ефект в нелинейното звено.

Да определим условието за инвариантност $y(t)y(t)$ относно $f(t)$.

$$(10) \quad y(t) = c(p)z(t) + K'(p)e(t) = \text{in var } f(t),$$

където $c(p)$ е коефициент на предаване от изхода на нелинейното звено до изхода на канала;

$K'(p)$ е коефициент на предаване от координата $\varepsilon(t)$ до изхода на канала.

Тогава:

$$(11) \quad y(T) = [a(p)K(p)c(p) + b(p)K'(p) - K'(p)\beta(p)a(p)K(p)]x(t) + [c(p) - K'(p)\beta(p)]f(t).$$

Така условието за инвариантност става:

$$(12) \quad c(p) - K'(p)\beta(p) \equiv 0$$

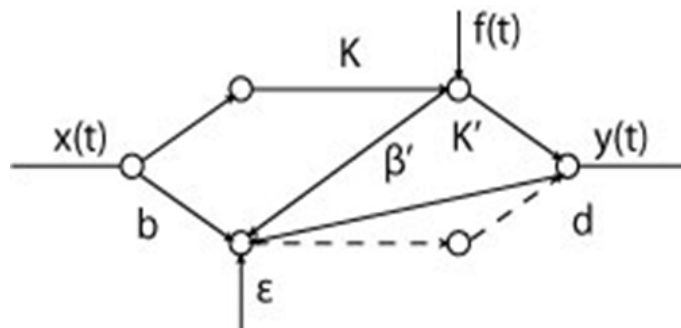
$$(13) \quad y(t) = b(p)K'(p)x(t) = T(p)x(t),$$

където $T(p) = b(p)K'(p)$ е линеен коефициент на предаване на канала.

Структурата на графа на синтезирания канал е дадена на фиг. 1.

От изложението следва, че инвариантността $y(t)$ относно $f(t)$ изисква в синтезираната структура наличието на два канала: един с изход от нелинейното звено $K_1(p) = c(p)$ и втори от координатата $\varepsilon(t) = -\beta(p)f(t)$ до изхода на канала $K_2(p) = K'(p)$. При това е необходимо да бъде изпълнено условието:

$$(14) \quad K_1(p)f(t) + K_2(p)\varepsilon(t) \equiv 0$$



Фиг. 1.

За да се избегне появата на допълнителни нелинейни и други нежелателни ефекти в $y(t)$, всички спомагателни съединителни звена в структурата на фиг. 1, са линейни, т.е. пасивни, което обезпечават точното изпълнение на условието за инвариантност.

За да се удовлетвори условието за усилване на сигнала в синтезираната структура, трябва да се осигури $T(p) > 1$, следователно и $b(p)K'(p) > 1b(p)$, което ще доведе до наличието на още едно усилващо звено в графа на фиг. 1.

Ако отделим допълнителна пасивна съединителна верига $d(p) \leq 1$ и означим коефициента на предаване на усилващото звено с $K''(p)$, то условието за усилване добива вида:

$$(15) \quad T(p) = K''(p)b(p)d(p)$$

Нелинейността на звеното K'' изисква ограничаване на входния сигнал:

$$(16) \quad \|x_b(t)\| \leq E_{02},$$

където E_{02} е праг на смущение за K'' .

Принципът на инвариантност в структурата на канала от фиг. 1 може да се реализира при произволна форма на входното въздействие, следователно на $f(t)$. Колкото е по-голямо E_{02} , толкова по-голямо ниво на входно въздействие може да се усилва от канала, без проява на нелинейни ефекти.

За да се намали $\|x_b(t)\|$, трябва напълно да се компенсира неизкривения сигнал, съдържащ се в $\varepsilon(t)$, т.е. да се осигури:

$$(17) \quad A(p) \equiv 0$$

$$(18) \quad b(p) - \beta(p)a(p)K(p) \equiv 0$$

Тогава:

$$(19) \quad \min \|x_b(t)\| = \min \|\varepsilon(t)\| = \|\beta(p)f(t)\|$$

Удовлетворяването на това условие осигурява инвариантност относно нелинейните свойства на нелинейното звено при максимално входно въздействие. Тогава:

$$(20) \quad \frac{K'(p)}{K(p)} = \frac{a(p)c(p)}{b(p)}.$$

Като се вземе предвид, че:

$$(21) \quad K'(p) = K''(p)d(p)$$

се получава:

$$(22) \quad \frac{K'(p)}{K(p)} = \frac{a(p)c(p)}{d(p)b(p)},$$

т.е. между стойностите на коефициентите на предаване на усилващите звена $K(p)$ и $K''(p)$ трябва да има връзка както при $a(p) = c(p)d(p) = b(p) = 1$, звената са идентични:

$$(23) \quad K(p) = K''(p)$$

При изпълнение на разгледаните условия се осъществява компенсация и на други нежелателни ефекти, възникващи в нелинейното звено като шумове, нестабилност на предаването и др. Шумовете обаче, които възникват във веригата на допълнителното звено не се компенсират и отношението "сигнал-шум" на изхода на целия канал ще се определя само от звеното.

Отношението „сигнал-шум“ на изхода на канала ще бъде толкова по-голямо, колкото по-голяма е стойността на $b \leq 1$, т.е. за $b \approx 1$.

За разширяване на областта на $\|x(t)\|$, където става компенсация на нелинейните ефекти, може да се въведе допълнителна защита на звено K'' . Това може да стане, например чрез линеен атенюатор на входа или чрез намаляване на предаването на звено $b \leq 1$, но това ще доведе до намаляване на съотношението сигнал-шум, т.е. до намаляване на реалната чувствителност на канала.

Ако каналът на фиг. 1. се приеме за ново нелинейно звено, то към него може да се разшири областта $\|x(t)\|$, където каналът е линеен. По този начин чрез принципа на инвариантността се синтезират итерационни структури с ненарастване на прага на смущения.

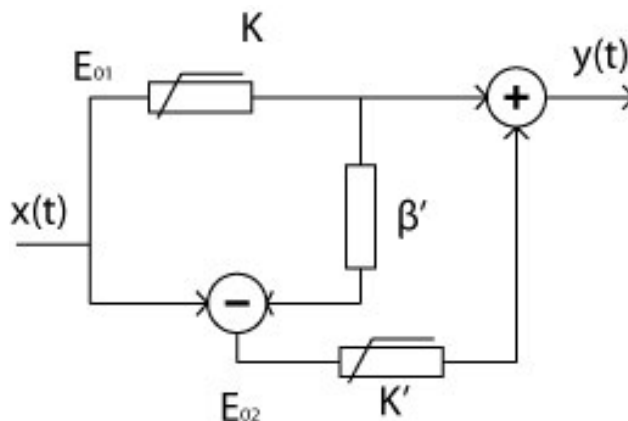
Освен описаният принцип на сигнална инвариантност, се използва и принципът на параметричната инвариантност, който предполага независимост на координатите от параметрите на звената на канала. По този начин могат да се синтезират високолинейни канали с произволен брой нелинейни звена.

Ако се разгледа случая $a = b = c = d = 1$, се преминава към по-простата структура на канала, дадена на фиг. 2.

Общият праг на смущенията за тази структура

$$(24) \quad E_0 = E_{01} + E_{02} ,$$

където E_{01} и E_{02} са праговете на смущения на двете звена.

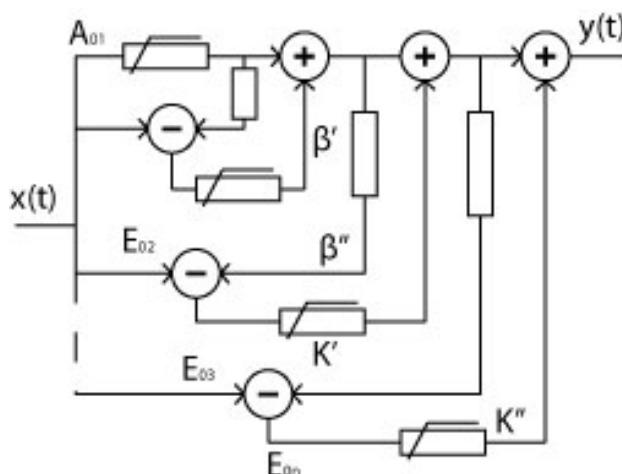


Фиг. 2.

Прилагайки към структурата на фиг. 2 последователно принципът на инвариантност, се получава итерационната структура, дадена на фиг. 3. За нея прагът на смущенията се определя като:

$$(25) \quad E_0 = \sum_{i=0}^n E_{0i} ,$$

а шумовете се определят от шума на последното в структурата n -то нелинейно звено.



Фиг. 3.

Принципът на инвариантността позволява да се синтезира канал за предаване на сигнали с компенсирани нелинейни и други характеристики, в частност предавателни и собствени шумове. За разлика от проблема за компенсиране на външните смущения в теорията на автоматичното управление, реализацията на принципа на инвариантността в радиокommunikационната техника има специфични особености, които основно се изразяват в начина на образуване на двуканалната компенсационна структура, а също и в ограниченията по отношение на нивото на входното въздействие и пределно достижимите характеристики.

Литература:

1. А н д о н о в, А. Шумоустойчивост и ефективност на системата за ВДРВ, София, ВТУ 2003.
2. Теория инвариантности автоматических систем. Под ред. Б. Н. Петров, М., РАН, 2001.